

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **DIPLOMSKI RAD**

**Duje Draganja**

Zagreb, 2014.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Dr. sc. Ivan Čatipović, dipl. ing.

Student:

Duje Draganja

Zagreb, 2014.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.

Imam želju izraziti zahvalnost svim dobrim ljudima koji su me pratili do mog cilja, a posebno mentoru doc. dr. sc. Ivanu Čatipoviću.

Duje Draganja

# DIPLOMSKI ZADATAK

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

Student: **Duje Draganja**

Mat. br.: 0023075087

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **STATIČKA ANALIZA FIKSNE REŠETKASTE PLATFORME ZA RAD U JADRANSKOM MORU**

Naslov rada na engleskom jeziku: **STATIC ANALYSIS OF FIXED JACKET OFFSHORE PLATFORM FOR OPERATION IN ADRIATIC SEA**

## Opis zadatka:

Fiksni objekt rešetkastog tipa (eng. fixed jacket offshore platform) pokazao se vrlo učinkovit za eksploataciju ugljikovodika s morskih nalazišta na malim dubina. U ovom diplomskom radu provest će se statička analiza ovog tipa objekta za rad na zadanoj lokaciji u Jadranskom moru.

U okviru diplomskog rada potrebno je:

1. Prema pravilima za gradnju pomorskih objekta, definirati projektne kriterije za navedeni objekt koji se moraju uzeti obzir kod osnivanja objekta i kod provedbe statičke analize.
2. Definirati različite kombinacije opterećenja za koje je potrebno provesti analizu. Navedene kombinacije sadržavati će opterećenja iz okoliša tj. djelovanje vjetra, valova i morske struje. U obzir će se također uzeti i opterećenja uslijed težine procesnih postrojenja.
3. Provest statičku analizu konstrukcije objekta koristeći metodu konačnih elementa za definirane kombinacije opterećenja.
4. Provesti provjeru nastanka tipičnih oštećenja za ovakav tip konstrukcije.

U radu koristi programski paket SESAM (Det Norske Veritas), te pravila za gradnju pomorskih objekata koja nalaže American Petroleum Institute.

Zadatak zadan:

Rok predaje rada:

Predviđeni datumi obrane:

25. rujna 2014.

27. studenog 2014.

3., 4. i 5. prosinca 2014.

Zadatak zadao:

Predsjednik Povjerenstva:

Doc. dr. sc. Ivan Čatipović

Prof. dr. sc. Nastia Degiuli

## SADRŽAJ

SADRŽAJ .....	II
POPIS SLIKA .....	V
POPIS TABLICA .....	VII
POPIS TEHNIČKE DOKUMENTACIJE .....	VIII
POPIS OZNAKA .....	IX
SAŽETAK .....	XII
SUMMARY .....	XIII
1. UVOD .....	1
2. PROJEKTNİ ZAHTJEVI PO PRAVILIMA AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE ....	3
2.1. Općenito .....	3
2.2. Projektni kriteriji i principi .....	3
2.2.1. Opterećenja zbog vlastite težine (engl. Dead Load) .....	3
2.2.2. Promjenjiva opterećenja (engl. Live Loads) .....	3
2.2.3. Okolišna opterećenja (engl. Environmental Loads) .....	4
2.2.4. Opterećenje tijekom gradnje (engl. Construction Loads) .....	4
2.2.5. Opterećenja prilikom premještanja (engl. Removal and Reinstallation Loads) ....	4
2.2.6. Dinamička opterećenja .....	4
2.3. Razine opterećenja .....	4
2.4. Projektna opterećenja .....	6
2.4.1. Valovi .....	6
2.4.1.1. Prividni valni period .....	8
2.4.1.2. Dvodimenzionalna kinematika vala .....	9
2.4.1.3. Kinematički koeficijent vala .....	11
2.4.1.4. Faktor blokiranja morske struje .....	11
2.4.1.5. Kombinacija kinematike vala i morske struje .....	12
2.4.1.6. Obraštanje (engl. Marine growth) .....	13
2.4.1.7. Koeficijenti otpora i inercije .....	13
2.4.1.8. Faktor utjecaja konduktora (engl. Conductor Shielding Factor) .....	14
2.4.1.9. Globalne sile na strukturu .....	15
2.4.2. Vjetar .....	16

---

•	Udari vjetra prosječnog trajanja kraće od minute .....	16
•	Stalna brzina vjetra trajanja duže od minute .....	16
2.4.3.	Morska struja .....	17
3.	LINEARNA VALNA TEORIJA .....	18
3.1.	Potencijalna teorija .....	20
3.1.1.	Rubni uvjeti .....	20
3.1.2.	Brzine i ubrzanja čestice vala .....	22
3.1.3.	Tlak .....	22
3.2.	Morisonova jednadžba .....	24
3.2.1.	Pretpostavke i definicije .....	24
3.2.2.	Sila inercije .....	25
3.2.3.	Sila otpora.....	27
4.	MODELIRANJE STRUKTURE METODOM KONAČNIH ELEMENATA .....	29
4.1.	Diskretizacija modela rešetkaste platforme konačnim elementima.....	29
4.2.	Prostorni gredni element .....	30
4.3.	Svojstva materijala i poprečnih presjeka.....	33
4.4.	Model superelemenata .....	36
4.5.	Metoda rješavanja sustava korištena u programu SESTRA.....	40
5.	MODELIRANJE OPTEREĆENJA .....	42
5.1.	Opterećenja težinama.....	42
5.2.	Opterećenje vjetra.....	43
5.3.	Opterećenja valova .....	44
5.4.	Opterećenje morske struje.....	47
5.5.	Opterećenja zbog obraštanja i hidrodinamički koeficijetni .....	47
5.6.	Sila uzgona .....	48
5.7.	Kombinacije opterećenja.....	49
5.7.1.	Ekstremni vremenski uvjeti.....	50
5.7.2.	Operativni vremenski uvjeti .....	50
6.	ODZIV STRUKTURE MODELA .....	51
6.1.	Kriteriji dopuštenih naprezanja osnovnih opterećenja.....	51
6.1.1.	Aksijalno vlačno naprezanje.....	51
6.1.2.	Aksijalno tlačno naprezanje .....	51

---

---

6.1.3. Naprezanje uslijed savijanja .....	52
6.1.4. Smična naprezanja .....	52
6.1.5. Torzijska naprezanja .....	53
6.2. Kriteriji dopuštenih naprezanja za kombinirana opterećenja .....	53
6.3. Prikaz rezultata dobivenih iz FRAMEWORK-a i XTRACT-a.....	54
6.3.1. Ekstremni vremenski uvjeti.....	56
6.3.2. Operativni vremenski uvjeti .....	61
7. ZAKLJUČAK.....	66
LITERATURA.....	67
PRILOZI .....	68

## POPIS SLIKA

Slika 1.	Klasičan primjer fiksne rešetkaste naftne platforme ( <a href="http://www.offshoreenergytoday.com/">http://www.offshoreenergytoday.com/</a> ) .....	1
Slika 2.	Podjela Jadranskog mora na istražna polja nafte i plina ( <a href="http://www.vecernji.hr/gospodarstvo/necemo-odustati-od-istrazivanja-u-jadranu-naftna-polja-nece-ugroziti-arbitrazu-931302">http://www.vecernji.hr/gospodarstvo/necemo-odustati-od-istrazivanja-u-jadranu-naftna-polja-nece-ugroziti-arbitrazu-931302</a> ).....	2
Slika 3.	Relativni prikaz valnog perioda i prirodnog perioda vibriranja konstrukcije.....	6
Slika 4.	Procedura proračuna sile vala i morske struje za statičku analizu, [1].....	7
Slika 5.	Dopplerov efekt uslijed morske struje konstantnog profila brzine .....	9
Slika 6.	Područje primjenjivosti valnih teorija .....	10
Slika 7.	Usporedba linearnog i nelinearnog izduženja profila morske struje, [1] .....	13
Slika 8.	Definiranje visine i debljine površinske hrapavosti,[1].....	14
Slika 9.	Određivanje faktora međusobnog utjecaja konduktora.....	15
Slika 10.	3D prikaz harmonijskog ravninskog vala u trenutku t .....	18
Slika 11.	2D prikaz harmonijskog ravninskog vala u trenutku t u x-z ravnini.....	19
Slika 12.	Vektorsko polje brzina u harmonijskom valu .....	23
Slika 13.	Kvalitativni prikaz tlaka u harmonijskom valu .....	24
Slika 14.	Kružni isječak za koji se računa hidrodinamička sila .....	25
Slika 15.	Model rešetkaste strukture platforme .....	30
Slika 16.	Prostorni gredni konačni element, [5] .....	31
Slika 17.	Poprečni presjek cilindra definiran u PREFEM-u, [4] .....	33
Slika 18.	Superelement 1.....	37
Slika 19.	Superelement 2.....	38
Slika 20.	Superelement 10.....	39
Slika 21.	Koncentrirane sile težina u čvorovima prikazane u Prefem-u .....	42
Slika 22.	Djelovanje koncentrirane sile vjetra u čvorovima u smjeru nailaska od 30° .....	44
Slika 23.	Globalni koordinatni sustav i smjer nailaska valova.....	45
Slika 24.	Računanje sile uzgona [6].....	48
Slika 25.	Pomaci čvorova m za slučaj opterećenja 4.....	56
Slika 26.	Naprezanje zbog savijanja $\sigma_{yx}$ kN/m <sup>2</sup> slučaj opterećenja 3 .....	57
Slika 27.	Naprezanje zbog savijanja $\sigma_{zx}$ kN/m <sup>2</sup> slučaj opterećenja 4 .....	58



---

Slika 28.	Provjera strukture na izvijanje za slučaj opterećenja 3 .....	59
Slika 29.	Provjera strukture na tečenje za slučaj opterećenja 3.....	60
Slika 30.	Pomaci čvorova m za slučaj opterećenja 3.....	61
Slika 31.	Naprezanje zbog savijanja $\sigma_{yx}$ kN/m <sup>2</sup> slučaj opterećenja 2.....	62
Slika 32.	Naprezanje zbog savijanja $\sigma_{zx}$ kN/m <sup>2</sup> slučaj opterećenja 4 .....	63
Slika 33.	Provjera strukture na izvijanje za slučaj opterećenja 3 .....	64
Slika 34.	Provjera strukture na tečenje za slučaj opterećenja 3.....	65

## POPIS TABLICA

Tablica 1. Faktor blokiranja strujanja morske struje strukturom platforme .....	12
Tablica 2. Koeficijenti oblika.....	17
Tablica 3. Svojstva materijala .....	33
Tablica 4. Geometrijske karakteristike poprečnih presjeka (S1-S3) .....	34
Tablica 5. Geometrijske karakteristike poprečnih presjeka (S4-S6) .....	34
Tablica 6. Geometrijske karakteristike poprečnih presjeka (S7-S9) .....	35
Tablica 7. Geometrijske karakteristike poprečnih presjeka (S10-S12) .....	35
Tablica 8. Izmjereni podaci o brzini vjetra .....	43
Tablica 9. Izračunate sile vjetra u smjeru osi X i Y .....	43
Tablica 10. Podaci o valovima .....	46
Tablica 11. Debljina obraštanja.....	47
Tablica 12. Suma globalnih sila i momenata na strukturu za ekstremne vremenske uvjete.....	50
Tablica 13. Suma globalnih sila i momenata na strukturu za operativne vremenske uvjete ....	50

## **POPIS TEHNIČKE DOKUMENTACIJE**

- 1 Horizontalni presjek na visini +6000
- 2 Bočni pogled na platformu

## POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
$T$	$s$	Valni period
$T_{app}$	$s$	Prividni valni period
$\lambda$	$m$	Duljina vala
$g$	$m/s^2$	Gravitacijsko ubrzanje
$V_1$	$m/s$	Brzine morske struje u smjeru napredovanja vala na razini mirne površine vode
$U_z$	$m/s$	Komponenta brzine morske struje na dubini $z$ u smjeru napredovanja vala
$d$	$m$	Dubina vode
$H$	$m$	Visina vala
$H_b$	$m$	Visina prelamanja vala
$\zeta$	$m$	Elevacija valne površine
$C_D$	—	Koeficijent otpora
$C_M$	—	Koeficijent inercije
$U_{mo}$	$m/s$	Najveća horizontalna brzina valne čestice na razini mirne površine vode
$S$	$m$	Udaljenost središta dviju konduktorskih cijevi
$x, y, z$	$m$	Lokalni koordinatni sustav
$\zeta_a$	$m$	Amplituda vala
$z'$	$m$	Elevacija izduženja profila morske struje
$e$	—	Relativna hrapavost
$C_s$	—	Koeficijent oblika
$D$	$m$	Promjer karakterističnog poprečnog presjeka
$\rho_z$	$t/m^3$	Gustoća zraka
$\mu$	$m/s$	Brzina vjetra
$A$	$m^2$	Površina poprečnog presjeka
$t$	$s$	Varijabla vremena
$k$	$rad/m$	Valni broj
$\omega$	$rad/s$	Kružna valna frekvencija
$v_x$	$m/s$	Komponenta brzine u smjeru koordinatne osi $x$
$v_z$	$m/s$	Komponenta brzine u smjeru koordinatne osi $z$
$\Phi_w$	$m^2/s$	Potencijal brzine strujanja
$\rho$	$t/m^3$	Gustoća mora
$p$	$MPa$	Tlak
$p_d$	$MPa$	Hidrodinamički tlak u harmonijskom valu
$p_0$	$MPa$	Atmosferski tlak

$r$	$m$	Polumjer poprečnog presjeka
$\mathbf{i}, \mathbf{j}, \mathbf{k}$	—	Jedinični vektori u smjeru osi x,y,z redosljedno
$a_{x0}$	$m/s^2$	Komponenta ubrzanja harmonijskog progresivnog vala u središnjoj osi cilindra
$v_{x0}$	$m/s$	Komponenta brzine harmonijskog progresivnog vala u središnjoj osi cilindra
$\mathbf{n}$	—	Jedinični vektor okomitog smjera na uzdužnu os elementa
$dF_{xo}$	$kN/m$	Diferencijalna inercijska sila
$dF_{xd}$	$kN/m$	Diferencijalna sila otpora
$\mathbf{C}_M$	—	Matrica koeficijenata inercije
$\mathbf{C}_D$	—	Matrica koeficijenata otpora
$\mathbf{C}$	—	Matrica hidrodinamičkih koeficijenata u lokalnom koordinatnom sustavu
$\mathbf{v}_n$	$m/s$	Komponenta vektora brzine strujanja u u smjeru vektora $\mathbf{n}$
$\mathbf{a}_n$	$m/s^2$	Komponenta vektora ubrzanja strujanja u smjeru vektora $\mathbf{n}$
$\mathbf{r}$	$m$	Vektor položaja u globalnom koordinatnom sustavu
$\mathbf{F}_n$	$kN$	Hidrodinamička sila u smjeru vektora $\mathbf{n}$
$\mathbf{V}^T$	$m$	Vektor stupnjeva slobode prostornog grednog elementa
$\mathbf{K}$	$kN/m$	Matrica krutosti prostornog grednog elementa
$\mathbf{T}$	—	Matrica transformacije prostornog grednog elementa
$u_i, v_i, w_i$	$m$	Komponente pomaka u lokalnom koordinatnom sustavu
$\bar{u}_i, \bar{v}_i, \bar{w}_i$	$m$	Komponente pomaka u globalnom koordinatnom sustavu
$X, Y, Z$	$m$	Globalni koordinatni sustav
$E$	$kN/m^2$	Youngov modul elastičnosti materijala
$G$	$kN/m^2$	Modul smicanja materijala
$\rho_{\check{c}}$	$t/m^3$	Gustoća čelika
$F_y$	$kN/m^2$	Najmanja dopuštena granica tečenja materijala
$F_e$	$kN/m^2$	Najmanja dopuštena granica razvlačenja materijala
$D_y$	$m$	Vanjski promjer cijevi
$t_s$	$m$	Debljina poprečnog presjeka cilindra
$S_{FY}, S_{FZ}$	—	Faktori smičnih površina u smjerovima globalnih koordinatnih osi Y i Z
$I_X$	$m^4$	Polarni moment tromosti
$I_Y$	$m^4$	Aksijalni moment tromosti oko osi Y
$I_Z$	$m^4$	Aksijalni moment tromosti oko osi Z
$I_{YZ}$	$m^4$	Devijacijski moment tromosti
$W_X$	$m^3$	Minimalni polarni moment otpora
$W_Y$	$m^3$	Minimalni moment otpora oko osi Y
$W_Z$	$m^3$	Minimalni moment otpora oko osi Z
$\mathbf{r}$	$m$	Vektor pomaka
$\mathbf{R}$	$kN$	Vektor opterećenja

$\mathbf{r}_i$	$m$	Vektor pomaka unutarnjih stupnjeva slobode
$\mathbf{r}_s$	$m$	Vektor pomaka super stupnjeva slobode
$H_{MAX}$	$m$	Najveća valna visina za određeni povratni period i smjer napredovanja
$T_{MAX}$	$s$	Valni period pri kojem se pojavljuje val najveće visine za određeni povratni period
$t_g$	$m$	Debljina morskog obraštanja
$\rho_g$	$t/m^3$	Gustoća morskog obraštanja
$\mathbf{F}_g$	$kN$	Dodatna težina zbog obraštanja
$\mathbf{F}_{bn}$	$kN$	Sila uzgona u smjeru vektora $\mathbf{n}$
$\mathbf{l}$	—	Jedinični vektor u smjeru uzdužne osi elementa
$\mathbf{F}_{bn}$	$kN$	Sila uzgona u smjeru vektora $\mathbf{l}$
$F_t$	$kN/m^2$	Aksijalno vlačno naprezanje
$K$	$m$	Faktor efektivne duljine
$F_a$	$kN/m^2$	Aksijalno tlačno naprezanje
$C$	—	Koeficijent izvijanja
$F_{xe}$	$kN/m^2$	Elastično lokalno izvijanje
$F_{xc}$	$kN/m^2$	Neelastično lokalno izvijanje
$F_b$	$kN/m^2$	Naprezanje uslijed savijanja
$F_v$	$kN$	Smična sila
$f_v$	$kN/m^2$	Najveće smično naprezanje
$f_{vd}$	$kN/m^2$	Dopušteno smično naprezanje
$f_t$	$kN/m^2$	Najveće torzijsko naprezanje
$M_t$	$kNm$	Moment torzije
$f_{td}$	$kN/m^2$	Dopušteno torzijsko naprezanje

## SAŽETAK

Unutar diplomskog rada provedena je statička analiza strukture fiksne rešetkaste platforme, i u slučaju operativnih vremenskih uvjeta i u ekstremnim vremenskim uvjetima. U razmatranje su uzeta opterećenja od vlastitih težina, opterećenja procesnog postrojenja, te okolišna opterećenja uključujući opterećenja uzrokovana vjetrom, valovima i morskom strujom. Formirane su kombinacije opterećenja koje uzrokuju najveća moguća naprezanja u elementima strukture. Hidrodinamičke sile morske struje i valova izračunate su korištenjem Morisonove jednadžbe. Analiza je provedena koristeći programski paket SESAM, temeljen na metodi konačnih elemenata, a po pravilima API Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms-Working Stress Design. Struktura je provjerena s obzirom na kriterij izvijanja i granicu tečenja koristeći API kod provjere unutar SESAM-ovg programa Framework.

Ključne riječi: Statička analiza fiksne rešetkaste platforme, metoda konačnih elemenata, valna opterećenja, Morisonova jednadžba, provjera kriterija izvijanja, provjera naprezanja s obzirom na granicu tečenja materijala

## **SUMMARY**

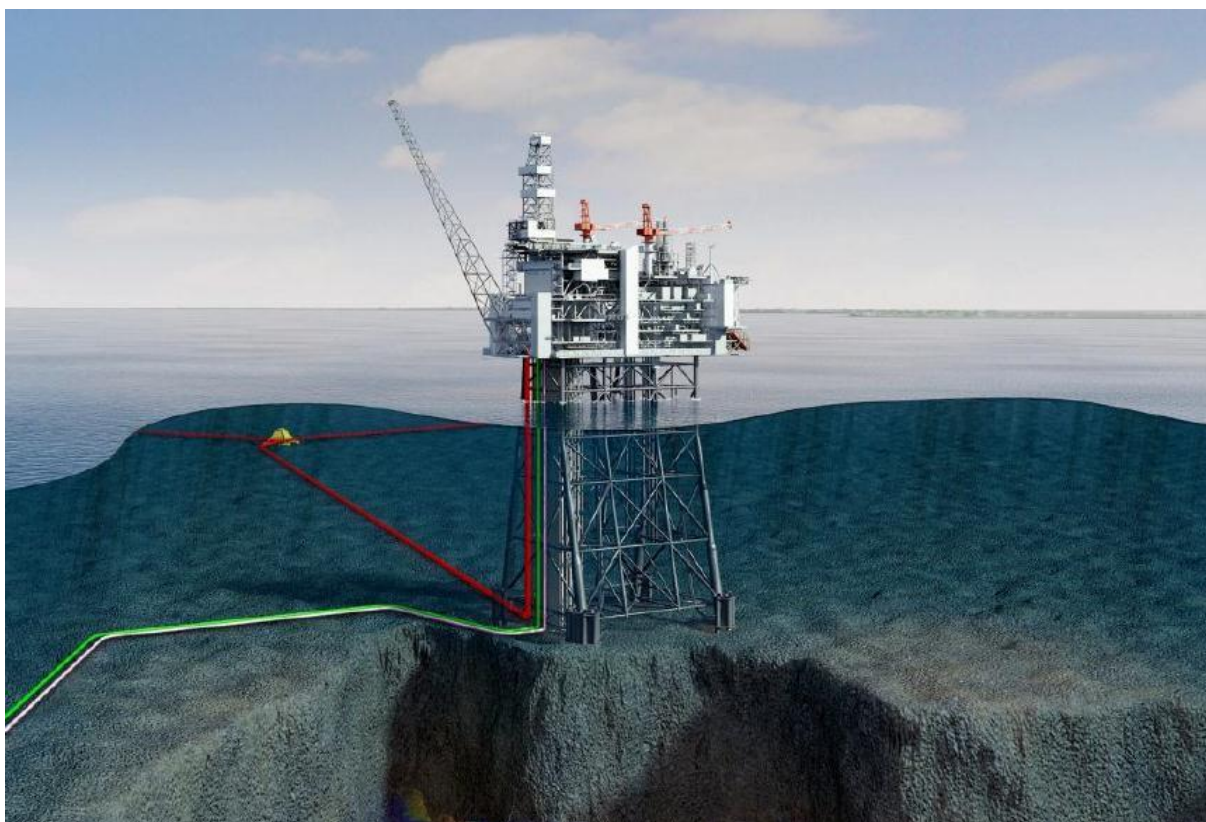
Static analysis of fixed offshore platform's structure in both operational and storm environmental load conditions is considered within this diploma thesis. Dead loads, live loads and environmental loads including wind, current and wave are taken into consideration within analysis, forming load combinations which produce maximum stress levels on structure elements. Hydrodynamic forces including wave and current forces are calculated using Morison equation. Stress analysis was performed using SESAM software based on finite element method, and guided by API Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms-Working Stress Design. Structure capability was checked in regard of stability and yield criteria, by API code checks implemented within SESAM software module Framework.

Key words: Fixed offshore platform, static structural analysis, finite element method, wave load, Morison equation, stability code check, yield code check



## 1. UVOD

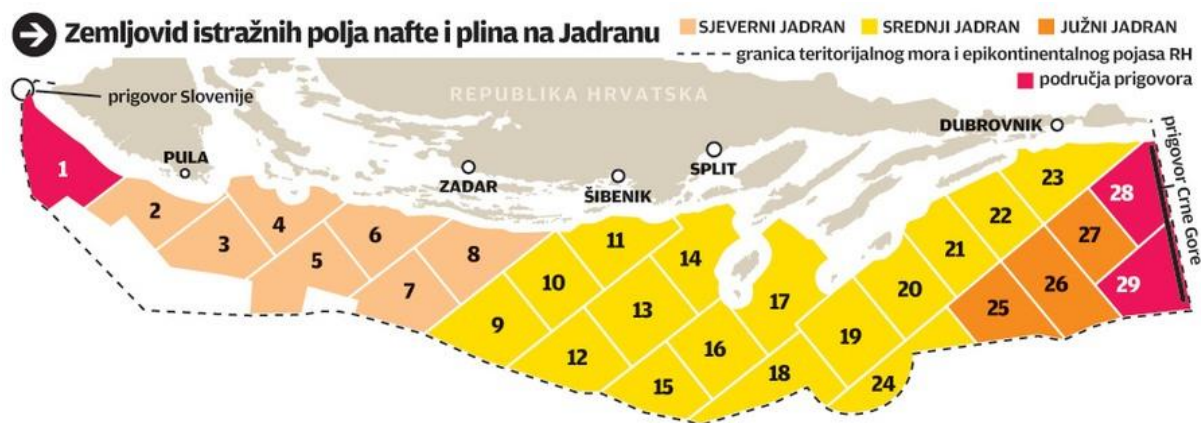
Fiksna rešetkasta naftna platforma tipičan je primjer pučinskog objekta morske tehnike. Prve primjene ovakvih objekata su zabilježene u Meksičkom zaljevu, ali od onda su se rasprostranile po čitavom svijetu. Njihov raspon primjene seže od plitkih voda dubine samo 12 metara pa do dubina preko 300 metara, od relativno blagih klimatskih područja primjerice Jadranskog mora pa sve do teških uvjeta Sjevernog Atlantika. Do sada je izgrađeno više od 4,000 primjeraka ovakvih platformi. Glavni dio strukture je njezin rešetkasti dio (engl. Jacket) koji na svom gornjem kraju podržava procesna postrojenja, opremu potrebnu za izvršavanje projektom predviđenih zadataka i stambene nastambe. Za dno je pričvršćena stupovima koji se zabijaju u morsko dno i time osiguravaju nepomičnost strukture bez obzira na često i rigorozne vremenske uvjete, Slika 1.



**Slika 1. Klasičan primjer fiksne rešetkaste naftne platforme (**  
**<http://www.offshoreenergytoday.com/>)**

Iako su ovakve platforme u upotrebi već više od pola stoljeća još uvijek su vrlo aktualne i često nezamjenjive u primjeni u plitkim morima. Naftna industrija je jedna od, ako ne i najunosnija, svjetska industrija te sve više država poučenih primjerom Norveške, a koja je

ulaganjem u vlastita znanja, kako od istraživanja podmorja pa do razvoja pučinskih objekata za crpljenje ugljikovodika s morskog dna, postala jedna od najbogatijih zemalja svijeta. U zadnje vrijeme se sve učestalije spominje i istraživanje podmorja Jadranskog mora i moguća buduća crpljenja nafte i zemnog plina, Slika 2 .



**Slika 2. Podjela Jadranskog mora na istražna polja nafte i plina**  
(<http://www.vecernji.hr/gospodarstvo/necemo-odustati-od-istrazivanja-u-jadranu-naftna-polja-nece-ugroziti-arbitrazu-931302>)

Treba također imati na umu moguće katastrofalne posljedice, pogotovo u relativno zatvorenom Jadranskom moru, kada bi došlo do havarije jedne ovakve platforme i izlivanja nafte u more. Upravo zbog takvih razloga tema ovog diplomskog rada je statička analiza strukture rešetkaste naftne platforme, čiji cilj je sprječavanje takvih neželjenih pojava, prvo analiziranjem, a ako je potrebno i korigiranjem karakteristika strukture platforme.

## 2. PROJEKTNI ZAHTJEVI PO PRAVILIMA AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE

### 2.1. Općenito

Pravila American Petroleum Institute Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms – Working Stress Design (API RP 2A-WSD) su namijenjena projektantima fiksnih pučinskih objekata kao vodič prilikom projektiranja novih objekata ili prenamjeni već postojećih platformi korištenih za bušenje, crpljenje, proizvodnju i skladištenje hidrokarbonata. Pravila objedinjuju sve zahtjeve i kriterije od proizvodnih do okolišnih opterećenja koja bi mogla utjecati na projekt platforme.

### 2.2. Projektni kriteriji i principi

#### 2.2.1. Opterećenja zbog vlastite težine (*engl. Dead Load*)

U nepromjenjiva opterećenja ubrajaju se sve težine koje se ne mijenjaju ovisno o vrsti operacije koja se provodi na platformi.

U nepromjenjiva opterećenja treba uključiti:

- Težinu strukture platforme koja se nalazi u zraku, uključujući težinu stupova, taloga i balasta
- Težinu opreme i dodatne pomoćne strukture montirane na platformu
- Hidrostatičke sile koje djeluju na strukturu ispod mirne razine vodene površine uključujući vanjski tlak i uzgon

#### 2.2.2. Promjenjiva opterećenja (*engl. Live Loads*)

Promjenjiva opterećenja su sva opterećenja kojima je platforma izložena tijekom svoje upotrebe a koja se mogu mijenjati bilo tijekom jedne faze proizvodnje ili prilikom izvođenja različitih proizvodnih operacija.

U promjenjiva opterećenja treba uključiti:

- Težinu opreme za bušenje i proizvodnju koja se može dodati ili skinuti s platforme
- Težine nastambe, opreme za spašavanje, težinu heliodroma, opreme za ronjenje te sve ostale opreme koja se može naknadno dodavati ili smanjivati ovisno o operaciji.
- Težine potrošnih namirnica i tekućina u skladišnim tankovima.

- Sile narinute na strukturu prilikom operacija kao što su bušenje bušotina, rukovanje materijalima, sidrenje opskrbnih brodova i slijetanja helikoptera.
- Sile na strukturu uzrokovane korištenjem palubne dizalice. Ove sile se razmatraju i zbog gibanja samog tereta i zbog same njegove težine.

### **2.2.3. Okolišna opterećenja (engl. *Environmental Loads*)**

Okolišna opterećenja su opterećenja na platformu uzrokovana prirodnim fenomenima kao što su vjetar, valovi, morske struje, potresi, snijeg, led. U okolišna opterećenja ubrajamo i promjene hidrostatskog tlaka i uzgona na elemente (engl. member) uzrokovane promjenom vodene razine zbog plime i valova. Djelovanje ovih opterećenja treba pretpostaviti iz svih smjerova osim ako ne postoje znanstvena mjerenja ili ranija iskustva koja bi rezultirala razumnijim pretpostavkama.

### **2.2.4. Opterećenje tijekom gradnje (engl. *Construction Loads*)**

Opterećenja tijekom gradnje konstrukcije rezultat su izrade, zaostalih naprezanja, transporta i postavljanja na željenu lokaciju.

### **2.2.5. Opterećenja prilikom premještanja (engl. *Removal and Reinstallation Loads*)**

Uz prije navedena opterećenja prilikom same izgradnje platforme, u slučaju premještanja platforme na novu lokaciju, potrebno je voditi računa i o opterećenjima koja se pri tom javljaju, a to su opterećenja zbog razmontiranja same platforme, postavljanja na baržu ili brod za prijevoz teških tereta, transporta te ponovnog montiranja na novoj lokaciji.

### **2.2.6. Dinamička opterećenja**

Dinamička opterećenja uključuju sva opterećenja cikličke prirode ili su rezultat udara na konstrukciju. Valovi, vjetar potres i rad strojeva najčešći su uzročnici dinamičkih opterećenja, dok udarno opterećenje može biti posljedica sudara barže ili broda o platformu.

## **2.3. Razine opterećenja**

Okolišna opterećenja su sve sile narinute na platformu prema odabranom projektnom slučaju. Ovisno da li se analiziraju operativna svojstva platforme u normalnim vremenskim uvjetima

ili sigurnost platforme u ekstremnim vremenskim uvjetima, razlikujemo dvije različite razine opterećenja. Razlikujemo operativnu razinu okolišnih opterećenja koja su manjeg intenziteta te ne predstavljaju prijetnju izvršavanju projektnih zadataka platforme, te projektnu razinu (stanje) opterećenja kojima se u obzir uzimaju najgore moguće kombinacije opterećenja koje rezultiraju i kritičnim naprezanjima strukture. Upravo projektna razina opterećenja bi se trebala uzeti u obzir prilikom osnivanja i analiziranja strukture platforme.

Projektna opterećenja bi u obzir trebala uzeti okolišna opterećenja u kombinaciji sa opterećenjima od vlastite težine i promjenjivih opterećenja na sljedeći način:

- Operativna okolišna opterećenja u kombinaciji sa opterećenjima od vlastite težine i najvećih mogućih promjenjivih opterećenja u skladu sa normalnim radnim uvjetima platforme
- Operativna okolišna opterećenja u kombinaciji sa opterećenjima od vlastite težine i najmanjih mogućih promjenjivih opterećenja u skladu sa normalnim radnim uvjetima platforme
- Projektna okolišna opterećenja u kombinaciji sa opterećenjima od vlastite težine i najvećih mogućih promjenjivih opterećenja u skladu sa ekstremnim vremenskim uvjetima
- Projektna okolišna opterećenja u kombinaciji sa opterećenjima od vlastite težine i najmanjih mogućih promjenjivih opterećenja u skladu sa ekstremnim vremenskim uvjetima

Okolišna opterećenja, izuzev potresa, trebala bi se kombinirati na način koji je u skladu sa vjerojatnošću njihovog istodobnog pojavljivanja prilikom proučavanja određenog slučaja opterećenja. Odnosno nije moguće da se valovi najveće značajne visine pojavljuju istodobno sa najvećom brzinom vjetra iz dva međusobno suprotna smjera nailaska. Potresno opterećenje bi se trebalo proučavati kao zasebno opterećenje na konstrukciju bez kombinacije sa ostalim okolišnim opterećenjima.

Operativni okolišni uvjeti i opterećenja bi trebali predstavljati relativno opasne uvjete za platformu, nije predviđeno da nužno predstavljaju kritičnu razinu opterećenja prilikom čijeg prelaska platforma više ne može normalno obavljati svoje zadatke. Za ovu razinu opterećenja preporuča se kao povratni period od 1 do 5 godina.

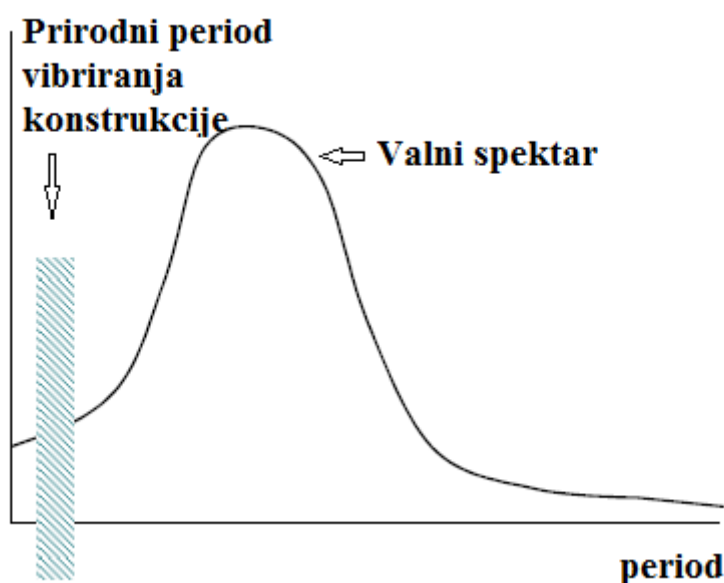
Sve težine i opterećenja zbog podizanja teških tereta palubnom dizalicom treba provjeriti na način da rezultiraju najvećim naprezanjima dijelova strukture platforme. Također i u slučaju

povremenih opterećenja prilikom izrade, transporta, postavljanja ili rastavljanja strukture treba provjeriti u kombinaciji sa okolišnim opterećenjima i prikladnim vlastitim težinama.

## 2.4. Projektna opterećenja

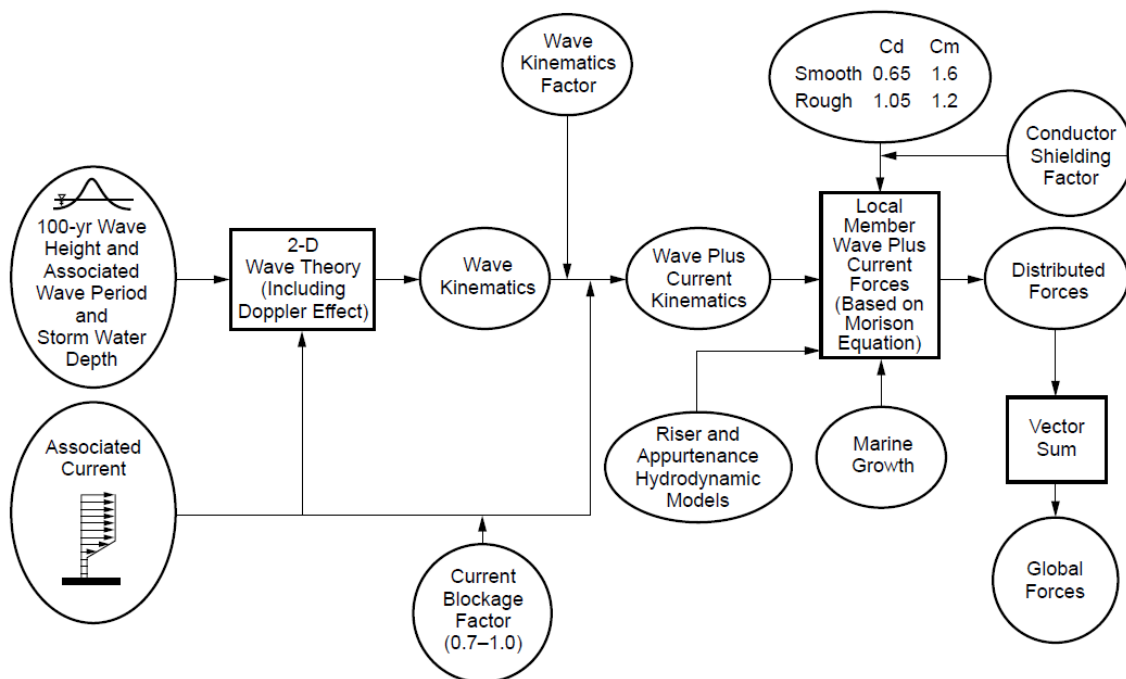
### 2.4.1. Valovi

Opterećenja uzrokovana valovima su dinamičke prirode ali za većinu projektnih dubina koje se trenutačno susreću, opterećenja valova je moguće adekvatno zamijeniti i njihovim statičkim ekvivalentima. Za velike projektne dubine ili fleksibilnije platforme statička analiza možda neće prikladno zamijeniti dinamičke pojave i sile na konstrukciju. Za takve platforme preporuča se korištenje dinamičke analize za provjeru strukture. Također treba naglasiti da su rešetkaste platforme koje se koriste na relativno malim dubinama dovoljno krute konstrukcije da se za njihovo projektiranje može koristiti statička analiza, Slika 3.



**Slika 3. Relativni prikaz valnog perioda i prirodnog perioda vibriranja konstrukcije**

Dakle fiksne rešetkaste platforme se izlažu projektnom valu uz zanemarivanje dinamičkog odziva platforme i difrakcije nailaznog vala. Metoda projektnog vala (engl. Deterministic static design wave force) za zadani smjer napredovanja vala započinje određivanjem značajki vala kao što su visina vala i valni period, projektne dubine mora i profila morske struje. Vrijednosti ovih parametara određuju se oceanografskim ispitivanjima i mjerenjima na zadanoj lokaciji. Potrebne korake za izračunavanje sile vala i morske struje potrebne za provedbu statičke analize prikazuje Slika 4. Slika je preuzeta iz literature [1].



Slika 4. Procedura proračuna sile vala i morske struje za statičku analizu, [1]

Postupak proračuna sile vala:

- Određuju se prividni valni period, koji uzima u obzir Dopplerov efekt morske struje na val
- Određuje se dvodimenzionalna kinematika vala iz prikladne valne teorije za određenu valnu visinu, dubinu i prividni valni period
- Horizontalne komponente brzine i ubrzanja čestice vala su umanjene kinematskim faktorom koji uzima u obzir širenje vala
- Efektivni lokalni profil morske struje je određen množenjem profila morske struje sa koeficijentom zaklanjanja morske struje (engl. current blockage factor)
- Efektivni lokalni profil morske struje vektorski se kombinira sa kinematikom vala da bi se odredile lokalne brzine i ubrzavanja fluida, za daljnje uvrštavanje u Morisonovu jednadžbu
- Dimenzije elemenata strukture se povećavaju zbog obraštanja
- Koeficijent otpora i inercije se određuju kao funkcije parametara vala i morske struje, te geometrije, hrapavosti, dimenzija i orijentacije elemenata strukture

- Prilikom proračunavanja sile vala u obzir se uzima i koeficijent zaklanjanja konduktorskih (provodnih) cijevi
- Razvija se hidrodinamički model za podizače i dodatke ne strukturu (cink protektori)
- Morisonovom jednačbom odrede se lokalne sile valova i morske struje za sve elemente platforme, konduktorske cijevi, podizače (engl. risers) i dodatke
- Globalna sila se izračunava kao vektorski zbroj svih lokalnih sila

#### 2.4.1.1. *Prividni valni period*

Morska struja u smjeru napredovanja vala djeluje na način da produljuje valnu duljinu, dok je morska struja koja se suprotstavlja napredovanju vala skraćuje. U jednostavnom slučaju kada val napreduje u istom smjeru kao i morska struja jednolikog profila po čitavoj dubini, prividni valni period kojeg vidi promatrač koji se giba sa morskom strujom, može se odrediti iz Slika 5 gdje  $T$  predstavlja stvarni valni period (kojeg vidi nepomični promatrač),  $V_1$  je komponenta morske struje u smjeru napredovanja vala,  $d$  je dubina mora u olujnim uvjetima (engl. storm water depth) i  $g$  je gravitacijsko ubrzanje. Slika 5 prikazuje omjer prividnog valnog perioda i stvarnog valnog perioda za vrijednosti veće od  $d/g \cdot T^2 > 0.01$  dok se za manje vrijednosti može koristiti izraz  $\left(\frac{T_{app}}{T}\right) = 1 + V_1 \sqrt{gd}$ . Slika 5 daje dobra približenja ako je profil morske struje konstantan za najmanje 50 m dubine. Za dobivanje prividnog valnog perioda  $T_{app}$  u slučaju proizvoljnih profila morske struje potrebno je iterativno riješiti 3 nelinearne jednačbe koje su 1989. razvili Kirby i Chen:

$$\frac{\lambda}{T} = \frac{\lambda}{T_{app}} + V_1 \quad (1)$$

$$T_{app}^2 = \frac{2\pi\lambda}{g \tanh\left(\frac{2\pi d}{\lambda}\right)} \quad (2)$$

$$V_1 = \frac{\left(\frac{4\pi}{\lambda}\right)}{\sinh\left(\frac{4\pi d}{\lambda}\right)} \int_{-d}^0 U_c(z) \cosh\left[\frac{4\pi(z+d)}{\lambda}\right] dz \quad (3)$$

Gdje je:

$\lambda$  – valna duljina

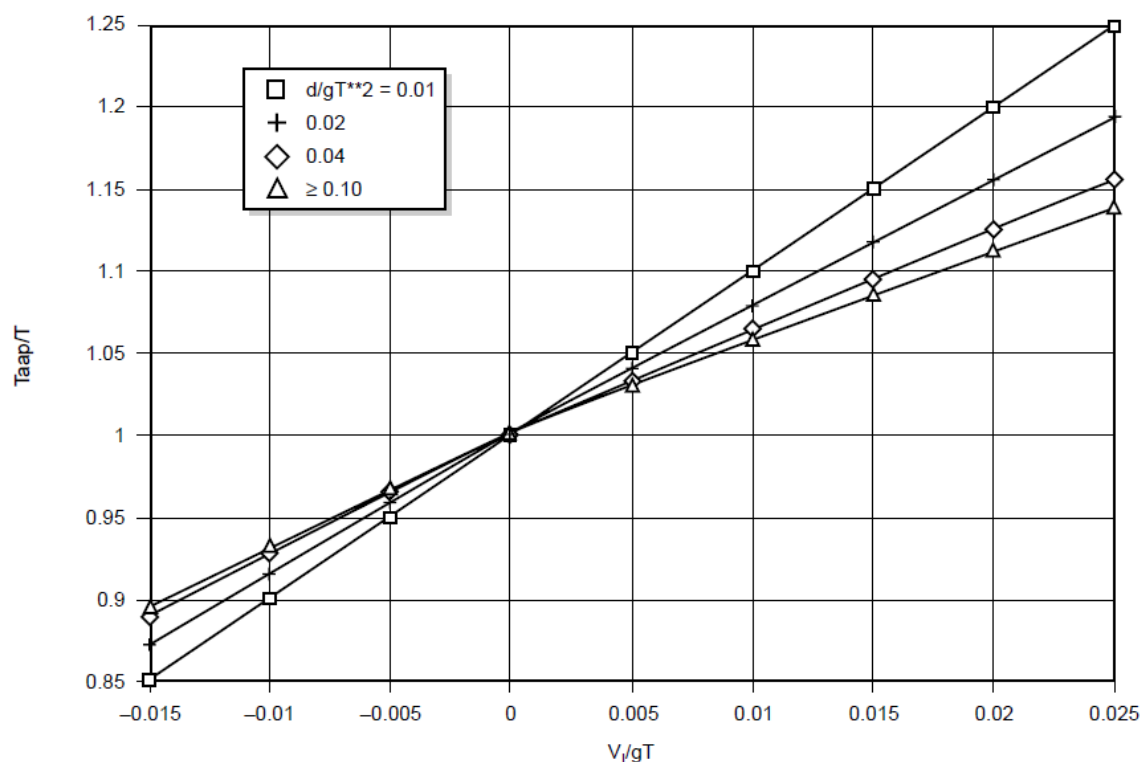
$T$  – valni period kakvog vidi nepomični promatrač



$T_{app}$  – valni period kakvog vidi promatrač koji se giba sa morskom strujom

$U_c(z)$  –komponenta brzine morske struje na dubini  $z$  (pozitivan iznad površine mora) u smjeru napredovanja vala

$d$  =dubina mora

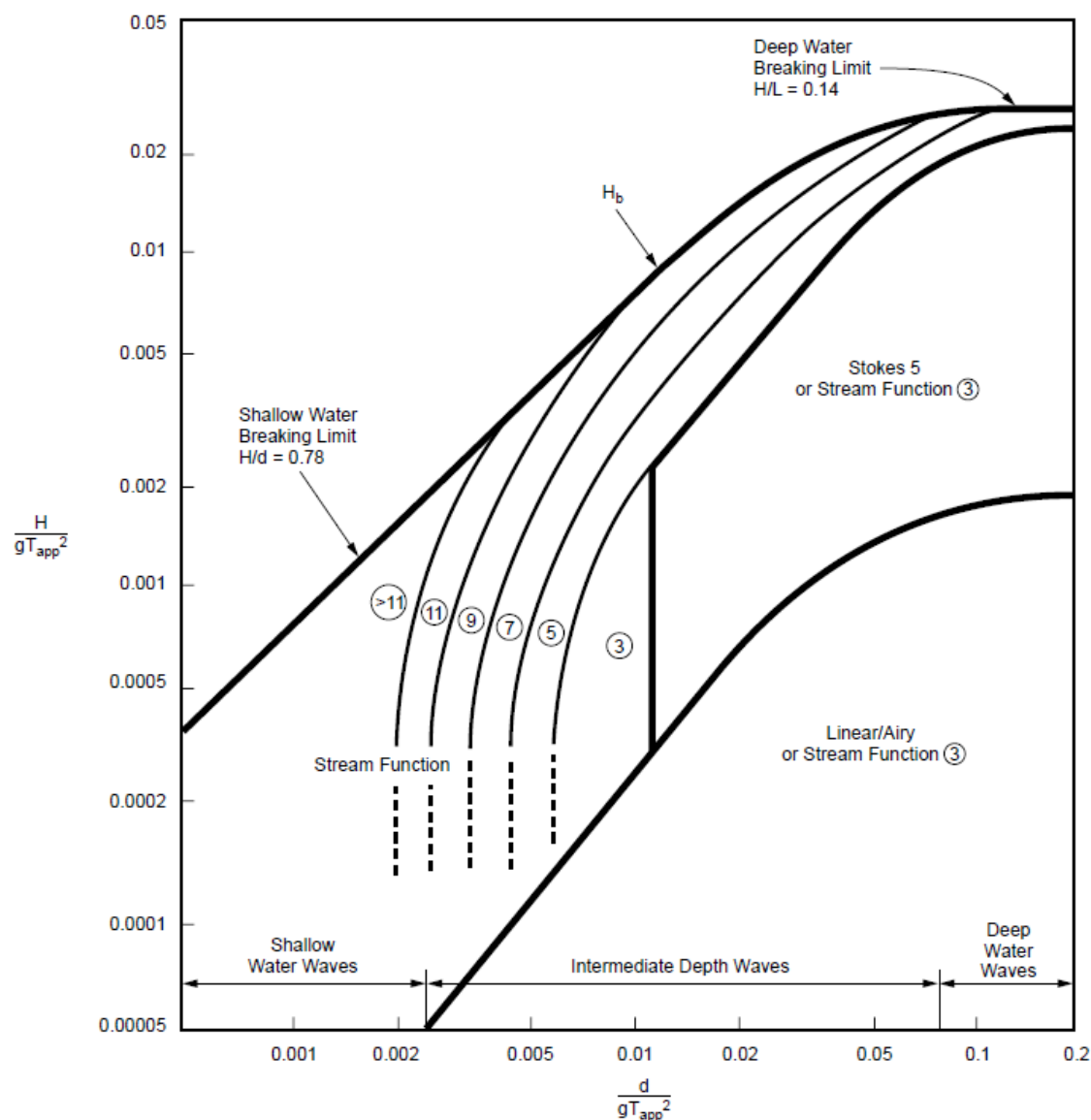


**Slika 5. Dopplerov efekt uslijed morske struje konstantnog profila brzine**

#### 2.4.1.2. Dvodimenzionalna kinematika vala

Postoji više raznih valnih teorija kojima se opisuje kinematika harmonijskog ravninskog vala čime se deterministički određuju valna opterećenja njime uzrokovana. Sve valne teorije daju približna rješenja na iste diferencijalne jednačbe i rubne uvjete. Sve proračunavaju simetričan val s obzirom na valni brijeg koji propagira ne mijenjajući svoj oblik. Razlikuju se po različitim funkcijskim formulacijama do stupnja kojim zadovoljavaju nelinearne kinematičke i dinamičke rubne uvjete na površini vala. Linearna valna teorija je primjenjiva samo kada je linearizacija rubnih uvjeta slobodne površine opravdana, odnosno kada je valna amplituda i strmina infinitezimalna. Stokesova valna teorija 5. reda zadovoljava rubne uvjete na slobodnoj površini sa dovoljnom preciznošću za relativno širok raspon primjena, što i pokazuje Slika 6. Također vrlo slična ovoj teoriji je i Chappellear-ova teorija koja koeficijente numeričke ekspanzije (proširenja, razvoja) određuje metodom najmanjih kvadrata umjesto

analitički i time smanjuje grešku prilikom određivanja rubnih uvjeta na slobodnoj površini. EXVP-D zadovoljava u potpunosti dinamički rubni uvjet dok teži što manjoj grešci kinematičkog rubnog uvjeta. Također, često korištena valna teorija, u slučaju kada Stokesova teorija 5. reda nije primjenjiva je strujna funkcija određenog reda. Red strujne funkcije koja će se primijeniti određuje se ili kao postotak greške pri određivanju dinamičkog rubnog uvjeta ili postotak promjene brzine i ubrzanja prilikom odabiranja strujnih funkcija viših redova.



Slika 6. Područje primjenjivosti valnih teorija

Gdje je:

$\frac{H}{gT_{app}^2}$  – bezdimenzionalni koeficijent valne strmine

$\frac{d}{gT_{app}^2}$  – bezdimenzionalni koeficijent relativne dubine

---

 $H$  –visina vala $H_b$  –visina prelamanja vala

#### 2.4.1.3. Kinematički koeficijent vala

Kada se valna opterećenja računaju po teoriji pravilnih harmonijskih ravninskih valova, kinematika se izračunava sa pretpostavkom da svi valovi propagiraju u jednom smjeru, dok se u stvarnosti morska površina sastoji i od kratkih i strmijih valova, nepravilnog propagiranja. Morska površina se može zamisliti kao superpozicija valova koji se međusobno razlikuju po amplitudi, periodu, i smjeru širenja. To širenje valova u različitim smjerovima rezultira manjim vršnim silama nego li je predviđeno idealiziranom pretpostavkom da valovi napreduju istim smjerom. To smanjenje iznosa sile se prilikom računanja metodom projektnog vala uzima u obzir smanjivanjem horizontalnih komponenti brzine i ubrzanja pravilnog harmonijskog progresivnog vala kinematičkim koeficijentom koji se nalazi u granicama od 0.85 do 0.95. Za detaljniju analizu potrebni su statistički podaci i oceanografska mjerenja na lokaciji. Za potrebe ovog diplomskog rada i zbog manjka oceanografskih podataka korišten je kinematički faktor 0.9 za sve smjerove nailaska vala.

#### 2.4.1.4. Faktor blokiranja morske struje

Brzina morske struje u blizini platforme umanjena je za određenu vrijednost blokiranja strujanja morske struje. Prisustvo platforme uzrokuje razilaženje strujanja morske struje, pa tako jedan dio morske struje zaobilazi platformu i ne prolazi kroz nju čime je brzina morske struje koja prolazi kroz platformu umanjena. Kako je iznos brzine morske struje bitan zbog izračunavanja lokalnih sila Morisonovom jednadžbom potrebno je uzeti u obzir ovaj utjecaj blokiranja strujanja morske struje strukturom platforme. U sljedećoj Tablica 1 dani su približni empirijski i iskustveni faktori za tipične fiksne rešetkaste platforme u ovisnosti o broju nogu (engl. Leg) platforme.

**Tablica 1. Faktor blokiranja strujanja morske struje strukturom platforme**

Broj nogu platforme	Smjer napredovanja	Faktor
3	Svi	0.90
4	Sa jednog kraja na drugi	0.80
	Dijagonalno	0.85
	Sa bočne strane	0.80
6	Sa jednog kraja na drugi	0.75
	Dijagonalno	0.85
	Sa bočne strane	0.80
8	Sa jednog kraja na drugi	0.70
	Dijagonalno	0.85
	Sa bočne strane	0.80

#### 2.4.1.5. Kombinacija kinematike vala i morske struje

Kinematika vala prilagođena kinematičkim koeficijentom zbog nepravilnog širenja valova, vektorski se kombinira sa profilom brzine morske struje koji je korigiran faktorom blokiranja strujanja kako je objašnjeno ranije. Profil morske struje je određen s obzirom na dubinu mora za vrijeme olujnih uvjeta projektnog kriterija, te je potrebno izdužiti ili sabiti profil s obzirom na elevaciju slobodne površine valom. Postoje dvije metode izduživanja profila morske struje, a to je nelinearno i linearno izduživanje. Iako ne linearno rezultira preciznijim rezultatima globalnih opterećenja za većinu primjena se koristi linearno izduženi profil morske struje gdje je odnos između  $z$  i  $z'$  definiram jednadžbom **Error! Reference source not found.**):

$$(z' + d) = (z + d)d/(d + \zeta) \quad (4)$$

Gdje je:

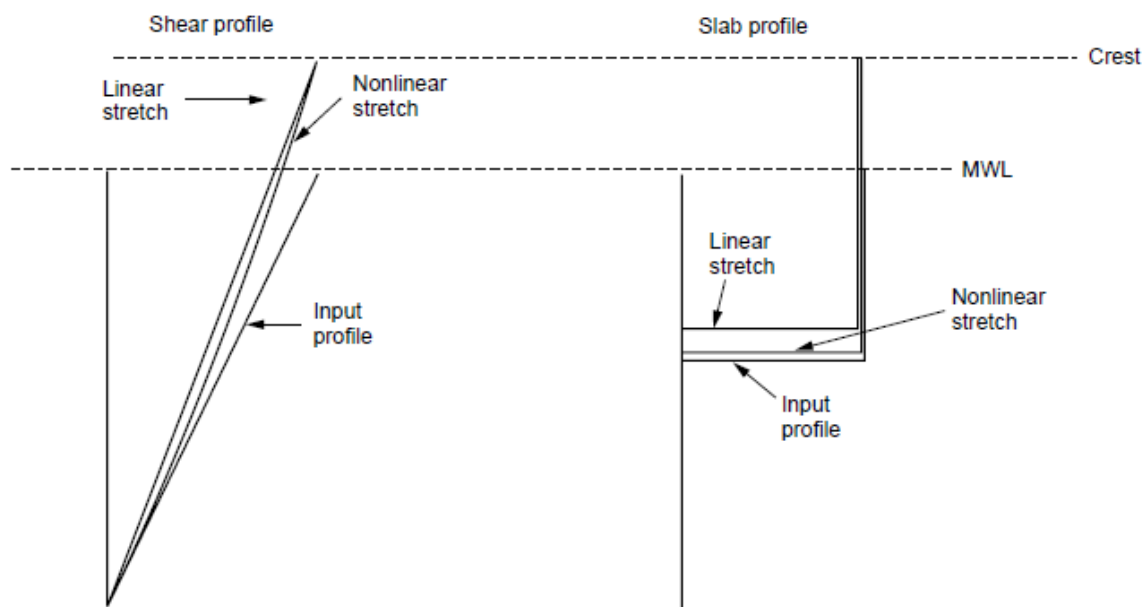
$z$  =razina profila morske struje

$\zeta$  =elevacija vala poviše promatrane čestice na razini  $z$

$z'$  =elevacija na koju se izdužio profil brzine morske struje

Potrebno je naglasiti da prikazani linearni model služi samo kao aproksimacija realne slike ali za profile morske struje daje vrlo dobre rezultate. Kvalitativni prikaz linearnog i nelinearnog

produženja profila morske struje za elevaciju morske površine valom prikazan je na Slika 7 iz literature [1].



**Slika 7.** Usporedba linearnog i nelinearnog izduženja profila morske struje, [1]

#### 2.4.1.6. Obraštanje (engl. Marine growth)

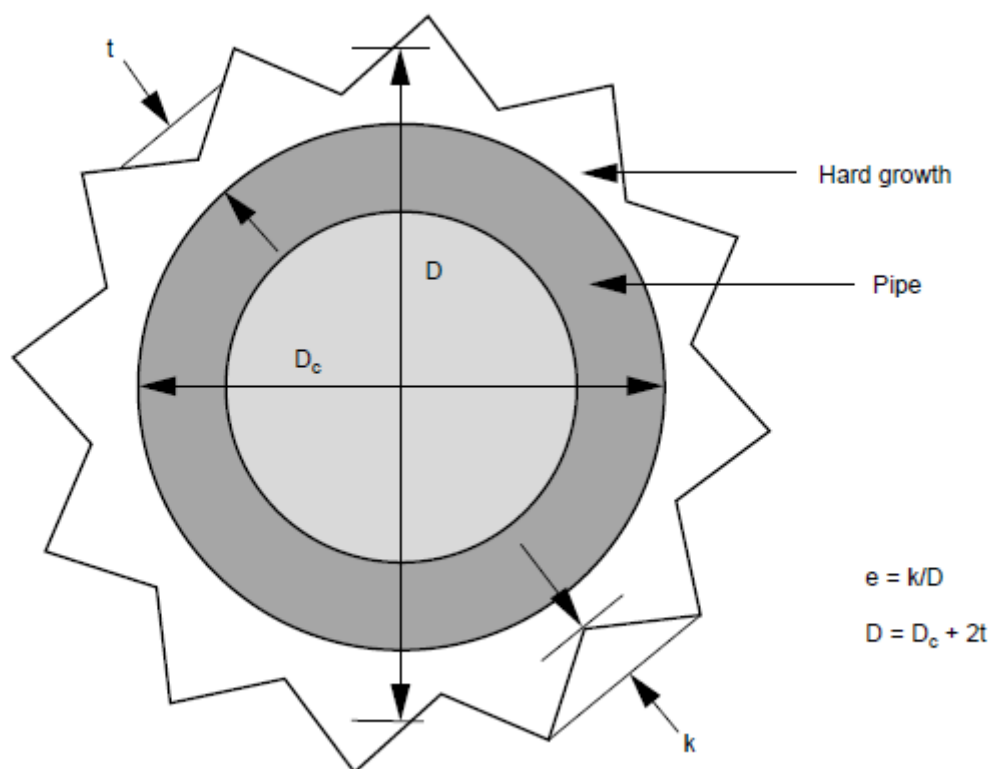
Za sve elemente strukture, konduktorske cijevi, podizače, i dodatke na strukturu potrebno je u obzir uzeti obraštanje na način da se poprečni presjek poveća za debljinu obraštanja. Također za kružne poprečne presjke potrebno je klasificirati da li su glatki ili grubi ovisno o količini procijenjenog obraštanja. Dodatni parametar koji utječe na koeficijent otpora elementa je relativna hrapavost  $e = k/D$ , gdje je  $k$  prosječna vrijednost visine obraslih morskih organizama. Slika 8 prikazuje način na koji se uzima u obzir obraštanje i hrapavost poprečnog presjeka elementa.

#### 2.4.1.7. Koeficijenti otpora i inercije

Za uobičajene projektne slučajeve, globalne sile na platformu se mogu izračunati prema slijedećim koeficijentima otpora i inercije za cilindre pri čemu se vrijednosti razlikuju u ovisnosti o relativnoj hrapavosti površine cilindara:

- Vrijednosti za glatke cilindre:  $C_D = 0.65$ ,  $C_M = 1.6$
- Vrijednosti za grube cilindre:  $C_D = 1.05$ ,  $C_M = 1.2$

Ove vrijednosti su prikladne u slučaju ujednačene morske struje i zanemarivih valova ili za slučaj velikih valova za koje vrijedi  $U_{mo}T_{app}/D > 30$ . Gdje je  $U_{mo}$  je najveća horizontalna brzina valne čestice na razini morske površine u olujnim uvjetima, izračunata prema kinematici dvodimenzionalnih harmonijskih valova,  $T_{app}$  je prividni valni period a  $D$  je promjer noge platforme na razini morske površine. Za sve ostale slučajeve detaljnija objašnjenja kako odrediti koeficijente  $C_D$  i  $C_M$  pogledati u literaturi [1] u poglavlju komentara 2.3.1. na stranici 134.

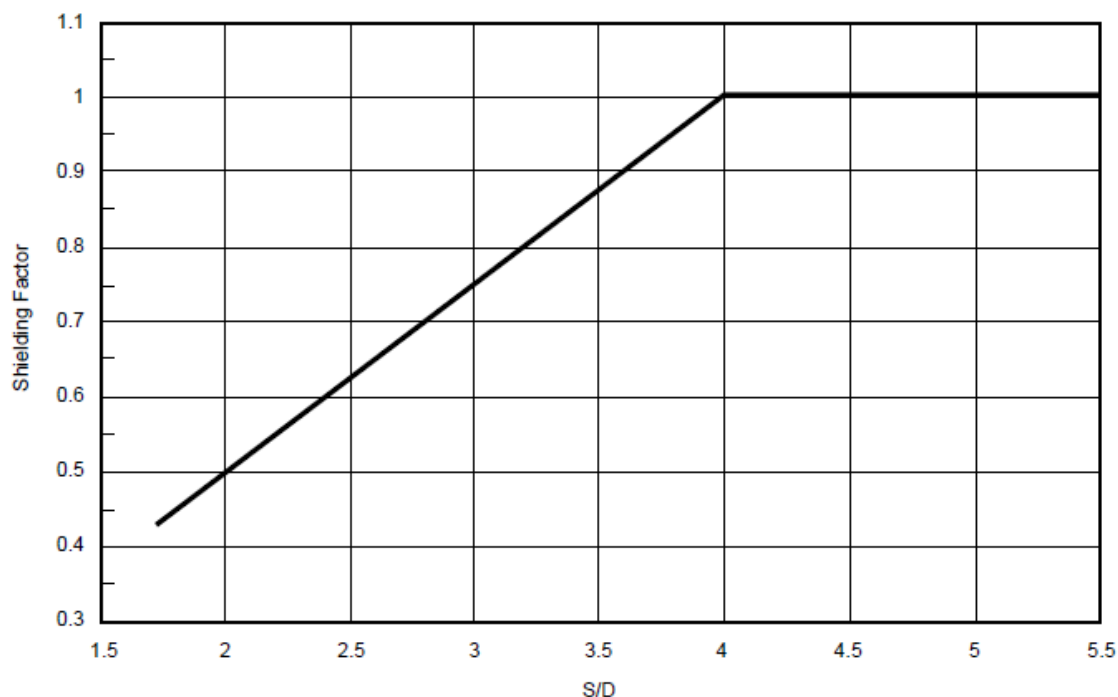


**Slika 8. Definiranje visine i debljine površinske hrapavosti,[1]**

#### 2.4.1.8. Faktor utjecaja konduktora (engl. Conductor Shielding Factor)

Ovisno o konfiguraciji strukture i broju konduktorskih cijevi sile valova na konduktorske cijevi mogu imati značajni utjecaj na ukupnu silu uzrokovanu valovima. Ako su konduktorske cijevi gusto raspoređene, sile na njih mogu biti smanjene zbog hidrodinamičkog otpora strujanju zbog međusobnog šticećenja (engl. shielding). Zato uvodimo faktor smanjenja sile vala, koji se primjenjuje na koeficijente otpora i inercije za konduktorske cijevi, a može se odrediti iz Slika 9 preuzete iz literature [1]. Na Slika 7,  $S$  označava udaljenost središta dviju konduktorskih cijevi u smjeru nailaska valova a  $D$  je promjer konduktora uključujući i

obraštanje. Ovaj faktor je opravdano koristiti u slučaju mirnog strujanja i zanemarivih valova ili u slučaju ekstremnih valova za koje vrijedi  $U_{mo}T_{app}/S > 5\pi$ . Faktor zbog međusobnog utjecaja konduktorskih cijevi se mora odrediti na drugačiji način za potrebe analize strukture na zamor, postupak je objašnjen u poglavlju C2.3.1b8 literature [1].



**Slika 9. Određivanje faktora međusobnog utjecaja konduktora**

#### 2.4.1.9. Globalne sile na strukturu

Ukupna horizontalna sila i prekretni moment se određuju vektorskim zbrajanjem svih lokalnih inercijskih sila i sila otpora na strukturu zbog djelovanja valova i morske struje, sila vjetra na strukturu platforme koja se nalazi iznad morske površine te na nastambe i ostalu opremu na palubi platforme. Udarne sile (engl. slam) mogu se zanemariti zbog praktično skoro vertikalnog djelovanja, također može se zanemariti i aksijalna Froude Krilovljeva sila. Valni brijeg trebao bi biti postavljen relativno na strukturu na način da rezultira najvećim mogućim horizontalnim silama i prekretnim momentima, imajući na umu da do najvećih vrijednosti prekretnog momenta i horizontalne sile može doći na različitim pozicijama valnog brijega. Također najveća lokalna naprezanja se mogu pojaviti i kod pozicije vala koja ne odgovara poziciji pri kojoj se ostvaruje/u najveće globalne sile.

### 2.4.2. Vjetar

Sile uzrokovane vjetrom naprežu gornji dio strukture platforme koji se nalazi iznad razine vodene površine, kao i cjelokupne opreme, palubnih nastambi i dizalica koje se nalaze na platformi. Brzina vjetra može se klasificirati kao:

- Udari vjetra prosječnog trajanja kraće od minute
- Stalna brzina vjetra trajanja duže od minute

Podaci o brzini vjetra moraju biti u skladu sa standardnom visinom mjerenja od 10 metara iznad prosječne razine vodene površine. Kao i opterećenja valova, tako su i opterećenja uzrokovana vjetrom dinamičke prirode, ali neke strukture na njih relativno statički reaguju. Za uobičajene rešetkaste fiksne naftne platforme u relativno plitkom moru, vjetar se uglavnom uzima kao manje bitan čimbenik u globalnom opterećenju na strukturu (u pravilu manje od 10 posto). Prilikom analiziranja globalnih opterećenja na strukturu platforme uzrokovanih vjetrom treba se koristiti podatak o stalnoj brzini vjetra, dok se za pojedinačne elemente strukture kao relevantni podatak treba koristiti brzina udara vjetra. Za fleksibilne konstrukcije koje su postavljene na većim dubinama, opterećenja od vjetra mogu igrati značajniju ulogu te bi im se trebalo detaljnije posvetiti. Dinamička analiza je obavezna ako se pokaže da polje vjetrova (engl. wind field) sadrži energiju na frekvenciji blizu prirodnih frekvencija platforme. Za detaljnije upute vezane za dinamičku prirodu i analizu opterećenja uzrokovanih vjetrom, pogledati u literaturi [1] poglavlje 2.3.2.b na stranici 18.

Sila otpora na objekt uzrokovana vjetrom računa se:

$$F = \left(\frac{1}{2}\rho_z\right)u^2C_sA \quad (5)$$

Gdje je:

$\rho_z$  = gustoća zraka,  $[t/m^3]$

$u$  –brzina vjetra,  $[m/s]$

$C_s$  – koeficijent oblika

$A$  –površina objekta,  $[m^2]$

Ako ne postoje dodatni podaci koji ukazuju na drugačije vrijednosti, preporuča se korištenje sljedećih koeficijenata oblika za okomiti smjer nailaska vjetra s obzirom na prociranu površinu:



Tablica 2. Koeficijenti oblika

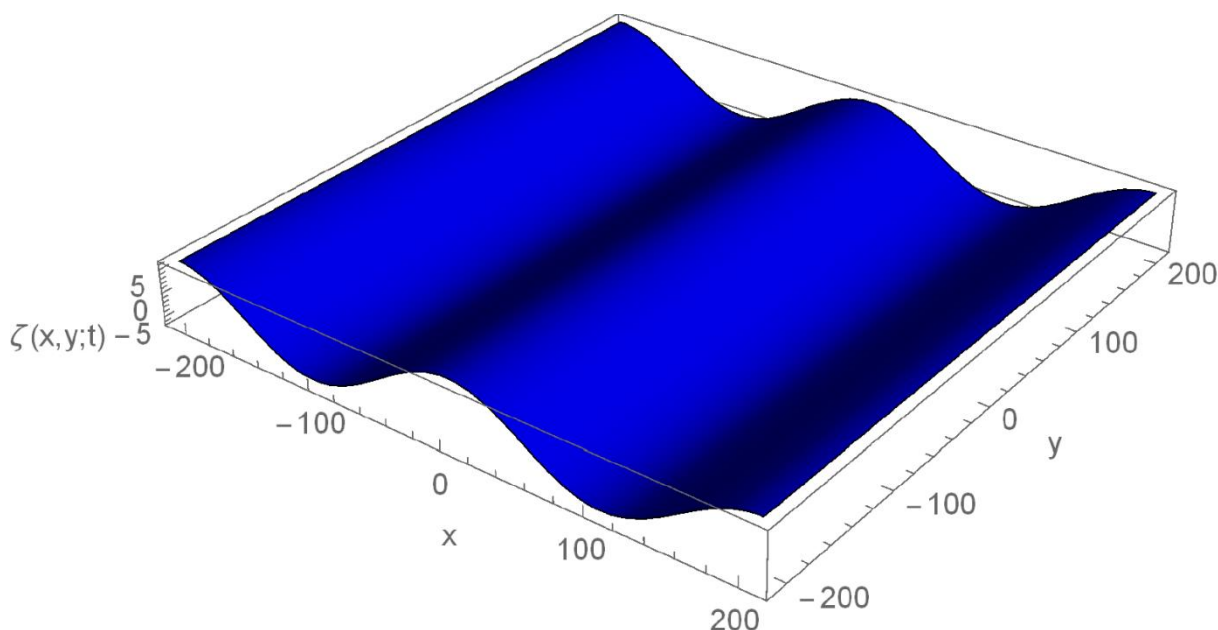
Nosači	1.5
Stranice nastambi	1.5
Cilindrični presjeci	0.5
Ukupna proicirana površina platforme	1.0

### 2.4.3. Morska struja

Ukupna vrijednost brzine morske struje je vektorski zbroj brzina plime i oseke, morskih struja uzrokovanih olujama i kružnim morskim strujama poput Golfske struje. Njihov relativni odnos i značaj za izračunavanje opterećenja, zavisi o lokaciji pučinskog objekta. Struje uzrokovane plimom i osekom su u dubljim morima praktički zanemarive, njihova vrijednost je nešto veća na širokim i plitkim morskim dnima, dok se na strmom dnu njihov utjecaj značajno smanjuje. Kružne morske struje su relativno nepromjenjive i promatraju se na razini oceana. Primjer takve morske struje je Golfska struja u Atlantskom Oceanu. Morske struje uzrokovane olujnim vremenom zapravo su rezultat puhanja snažnih vjetrova te gradijentom atmosferskog tlaka koje vlada tijekom oluje. Brzine olujnih morskih struja su vrlo kompleksne funkcije jačine oluje, meteoroloških karakteristika, konfiguracije obale ako postoji i gustoće samog mora. U dubokim morima na otvorenim prostranstvima površinska brzina olujne morske struje može se grubo odrediti kao 2-3 posto stalne brzine puhanja vjetra trajanja jednog sata. Treba imati na umu da što je lokacija platforme bliže obali i plićim morima ove se vrijednosti mogu značajno povećati. Prilikom određivanja profila morske struje te mijenjanja određenih brzina ovisno o smjeru i dubini, trebalo bi kontaktirati kvalificiranog oceanografa. Kako je ranije objašnjeno treba vektorski superponirati vrijednosti brzina vjetra i valova prije računanja sila koristeći Morisonovu jednadžbu.

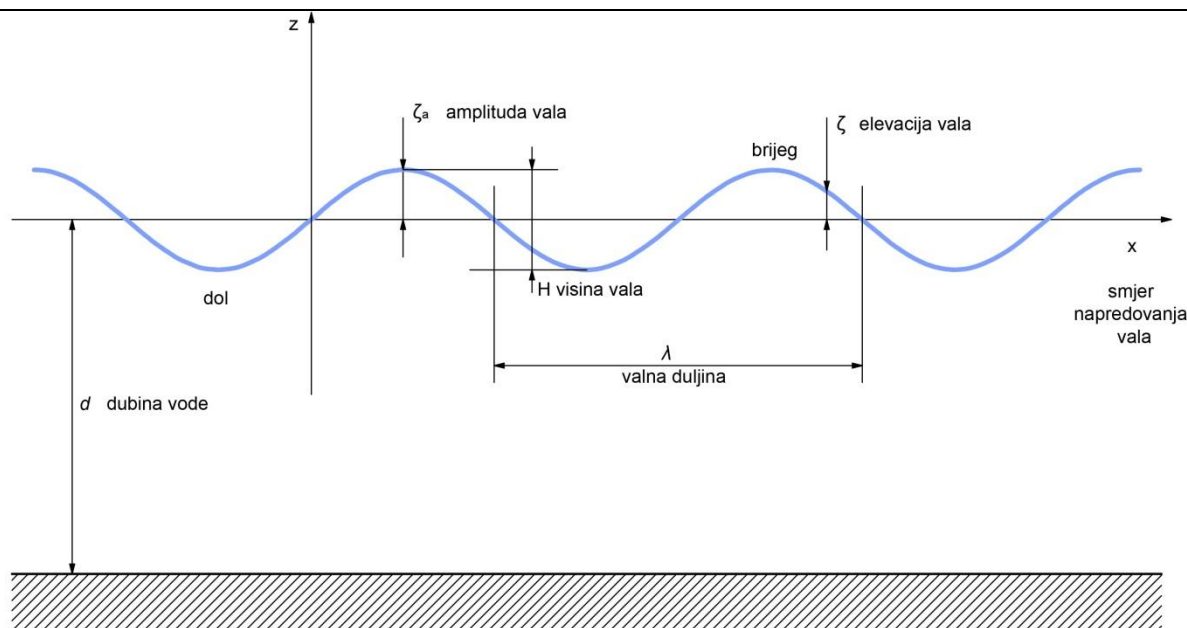
### 3. LINEARNA VALNA TEORIJA

Linearna valna teorija je najjednostavnija teorija dvodimenzionalnog progresivnog površinskog vala. Model koji objašnjava pojave i strujanje u valu je model harmonijskog progresivnog vala koji se još naziva i Airyevim valom. Iako ova teorija ne opisuje u potpunosti valove čija opterećenja se koriste pri analizi strukture zadane platforme, ova teorija omogućava relativno jednostavno razumijevanje fizikalnih pojava i zakonitosti gibanja vala koja su primjenjiva i na kompleksnije valne teorije poput Stokesove valne teorije 5. reda kakvu koristi programski paket Wajac prilikom modeliranja opterećenja na strukturu. Prilikom primjene linearne valne teorije treba imati na umu ograničenja koja su pri tom usvojena. Prva usvojena pretpostavka koja vodi lineariziranju problema jest da je amplituda vala mala u odnosu na valnu duljinu i dubinu vode, te također da brzina čestice vala mora biti mala u odnosu na brzinu napredovanja vala. Zbog toga ova teorija ima ograničenu točnost za visoke valove i valove u plitkim vodama blizu obale.



**Slika 10. 3D prikaz harmonijskog ravninskog vala u trenutku t**

Slika 10 prikazuje snimak profila ravninskog harmonijskog progresivnog vala u nekom trenutku t. Vidljivo je da se profil vala ne mijenja u smjeru y. Upravo zbog toga se ovakav model vala naziva ravninskim ili dvodimenzionalnim harmonijskim valom. Ishodište koordinatnog sustava je postavljeno je na slobodnu površinu, pozitivni smjer osi z ide vertikalno prema gore, dok je pozitivan smjer osi x usmjeren u smjeru napredovanja vala.



**Slika 11. 2D prikaz harmonijskog ravninskog vala u trenutku  $t$  u  $x$ - $z$  ravnini**

Slika 11 predstavlja presjek profila vala u  $x$ - $z$  ravnini te su na slici prikazane glavne fizikalne veličine. Dubina vode je definirana u skladu sa poviše navedenim koordinatnim sustavom kao pozitivna vrijednost  $d$  mjerena između dna vode ( $z = -d$ ) i razine mirne vode  $z = 0$ . Elevacija slobodne površine  $\zeta$  opisana je kao harmonijski val amplitude  $\zeta_a$  koja je definirana kao udaljenost između najviše točke valnog brijega i razine mirne vode ili kao udaljenost najniže točke valnog dola i razine mirne vode. Valna visina  $H$  definirana je kao dvostruka vrijednost amplitude vala:

$$H = 2 \zeta_a \quad (6)$$

Duljina vala  $\lambda$  definirana je kao horizontalna udaljenost između dva uzastopna valna brijega ili dola. Vremenski razmak između nailaska dvaju uzastopnih brijegova naziva se periodom vala  $T$  iako ga je uobičajeno definirati i kao dva uzastopna ulazna ili silazna presijecanja razine mirne vode. Značajke harmonijskog vala mogu se izraziti i pomoću kutnih vrijednosti preko vrijednosti valne duljine i perioda:

$$k = \frac{2 \pi}{\lambda} \quad (7)$$

$$\omega = \frac{2 \pi}{T} \quad (8)$$

Valni broj  $k$  [ $rad/m$ ] označava broj valnih duljina koje stanu u  $2\pi$  metara, dok kružna valna frekvencija  $\omega$  [ $rad/s$ ] označava broj valnih perioda unutar  $2\pi$  sekunde.

### 3.1. Potencijalna teorija

Da bi neko strujanje odgovaralo potencijalnom strujanju mora zadovoljiti pretpostavke da je neviskozno, nestlačivo, homogeno, bez prisutnosti kavitacijskih mjehurića plina, te u području takvog strujanja vrijede pojednostavljeni zakoni mehanike fluida. Strujanje fluida unutar čijeg polja brzina ne postoji rotacija čestica naziva se bezvrtložnim, takvo polje brzina može se definirati skalarnom funkcijom potencijala brzine strujanja koja predstavlja matematički izraz koji ima svojstvo da je komponenta brzine u točki fluida u bilo kojem odabranom smjeru zapravo njegova derivacija u tom smjeru. Pa tako za komponente brzine strujanja ( $v_x, v_z$ ) u nekom trenutku  $t$  vrijedi:

$$v_x = \frac{\partial}{\partial x} \Phi(x, z; t) \quad (9)$$

$$v_z = \frac{\partial}{\partial z} \Phi(x, z; t) \quad (10)$$

Da bi se teorija potencijalnog strujanja mogla koristiti u opisu značajki valova, potrebno je uz gornje pretpostavke pretpostaviti i vrlo malu valnu strminu, iz čega proizlazi da se njen kvadrat u jednadžbama koje opisuju val može zanemariti. U linearnoj valnoj teoriji harmonijski promjenjivi pomaci, brzine, ubrzanja i vrijednosti tlaka u linearnom su odnosu prema elevaciji valne površine.

#### 3.1.1. Rubni uvjeti

Prema literaturi [2] izraz za potencijal brzine strujanja u valu je harmonijska funkcija te je prikazana u sljedećem obliku:

$$\Phi_w = P(z) \sin(kx - \omega t) \quad (11)$$

Gdje je  $P(z)$  nepoznata funkcija ovisna o varijabli  $z$ . Potencijal strujanja harmonijskog vala  $\Phi_w(x, z; t)$  mora zadovoljiti četiri rubna uvjeta:

- Laplaceova jednadžba

$$\nabla^2 \Phi_w = \frac{\partial^2 \Phi_w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi_w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Phi_w}{\partial z^2} \quad (12)$$

Odnosno promatrajući problem u dvije dimenzije:

$$\nabla^2 \Phi_w = \frac{\partial^2 \Phi_w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi_w}{\partial z^2} \quad (13)$$

- Rubni uvjet nepromočivosti na dnu

Određuje da je vertikalna komponenta brzine strujanja čestice fluida na dnu jednaka nuli. Tako vrijedi za  $z = -d$ :

$$v_z = \frac{\partial \Phi_w}{\partial z} = 0 \quad (14)$$

- Dinamički rubni uvjet na slobodnoj površini

Određuje da je tlak na slobodnoj površini jednak atmosferskom. Tlak unutar nestacionarnog i bezvrtložnog strujanja određuje se Bernoullijevom jednačbom u općenitoj formi:

$$\frac{\partial \Phi_w}{\partial t} + \frac{1}{2} \left[ \left( \frac{\partial \Phi_w}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial \Phi_w}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial \Phi_w}{\partial z} \right)^2 \right] + \frac{p}{\rho} + gz = C \quad (15)$$

Gdje je  $C$  konstantna vrijednost. Linearizirani oblik gornje jednačbe dobije se isključivanjem kvadratnih članova:

$$\frac{\partial \Phi_w}{\partial t} + \frac{p}{\rho} + gz = C \quad (16)$$

Iz definicije dinamičkog rubnog uvjeta proizlazi da je tlak na slobodnoj površini  $z = \zeta$  jednak atmosferskom tlaku  $p_0$ :

$$\frac{\partial \Phi_w}{\partial t} + \frac{p_0}{\rho} + g\zeta = C \quad (17)$$

Konstantu vrijednost  $\frac{p_0}{\rho} - C$  se može isključiti iz gornje jednačbe jer ne utječe na komponente brzine koje se dobiju iz potencijala brzine, te jednačba dinamičkog uvjeta za  $z = \zeta$  poprima oblik:

$$\frac{\partial \Phi_w}{\partial t} + g\zeta = 0 \quad (18)$$

Uz činjenicu da je  $\zeta$  relativno mala vrijednost možemo zapisati i linearizirani oblik dinamičkog rubnog uvjeta na slobodnoj površini  $z = 0$ :

$$\frac{\partial \Phi_w}{\partial t} + g\zeta = 0 \quad (19)$$

Uvrštavanjem izraza  $\Phi_w = P(z) \sin(kx - \omega t)$  u gornje rubne uvjete te njihovim rješavanjem u potpunosti je moguće definirati potencijal brzine strujanja, pa tako zamjenjujući dosada nepoznati član  $P(z)$  dobivamo izraz za potencijal brzine strujanja:

$$\Phi(x, z; t) = \frac{\zeta_a g}{\omega} \frac{\cosh[k(d + z)]}{\cosh(kd)} \sin(kx - \omega t) \quad (20)$$

Iako je potencijal brzine strujanja u potpunosti definiran sa tri navedena rubna uvjeta, još uvijek nije poznat odnos između valne duljine i valnog perioda. Njihov odnos određuje se preko kinematičkog rubnog uvjeta koji uz dinamički rubni uvjet, mora biti zadovoljen na slobodnoj površini vala.

- Kinematički rubni uvjet na slobodnoj površini

Određuje da je vertikalna komponenta brzine čestice fluida na slobodnoj površini  $z = \zeta$  jednaka vertikalnoj brzini slobodne površine:

$$\frac{Dz}{Dt} = \frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial \zeta}{\partial x} \frac{dx}{dt} = \frac{\partial \zeta}{\partial t} + v_x \frac{dx}{dt} \quad (21)$$

Drugi član se zbog pretpostavke o maloj valnoj strmini, kao umnožak dviju malih vrijednosti može zanemariti kao mala veličina drugog reda. Izraz za linearizirani oblik kinematičkog rubnog uvjeta glasi na slobodnoj površini  $z = \zeta$ :

$$\frac{dz}{dt} = \frac{\partial \zeta}{\partial t} \quad (22)$$

Analogno dinamičkom rubnom uvjetu i kinematički rubni uvjet vrijedi za  $z = 0$  te se njihovom kombinacijom dobiva kinematičko-dinamički rubni uvjet ili Cauchy-Poissonov uvjet:

$$\frac{\partial z}{\partial t} + \frac{1}{g} \frac{\partial^2 \Phi_w}{\partial t^2} = 0 \quad (23)$$

Uvrštavanjem izraza za potencijal brzine strujanja (20) i činjenice da vrijedi  $\partial z / \partial t = \partial \Phi_w / \partial z$  dobiva se izraz koji povezuje valnu duljinu i period odnosno kružnu frekvenciju i valni broj za proizvoljnu dubinu  $d$ , koji se naziva disperzivna jednadžba:

$$\omega^2 = kg \tanh(kd) \quad (24)$$

### 3.1.2. Brzine i ubrzanja čestice vala

Komponente brzina dobiju se iz potencijala brzine kako je ranije definirano:

$$v_x = \frac{\partial \Phi_w}{\partial x} = \frac{dx}{dt} = k \frac{\zeta_a g}{\omega} \frac{\cosh[k(d+z)]}{\cosh(kd)} \cos(kx - \omega t) \quad (25)$$

$$v_z = \frac{\partial \Phi_w}{\partial z} = \frac{dz}{dt} = k \frac{\zeta_a g}{\omega} \frac{\sinh[k(d+z)]}{\cosh(kd)} \sin(kx - \omega t) \quad (26)$$

Komponente ubrzanja dobiju se derivacijom komponenti brzina:

$$\dot{v}_x = \frac{\partial^2 \Phi_w}{\partial x^2} = \frac{dv_x}{dt} = \zeta_a k g \frac{\cosh[k(d+z)]}{\cosh(kd)} \sin(kx - \omega t) \quad (27)$$

$$\dot{v}_z = \frac{\partial^2 \Phi_w}{\partial z^2} = \frac{dv_z}{dt} = -\zeta_a k g \frac{\sinh[k(d+z)]}{\cosh(kd)} \cos(kx - \omega t) \quad (28)$$

### 3.1.3. Tlak

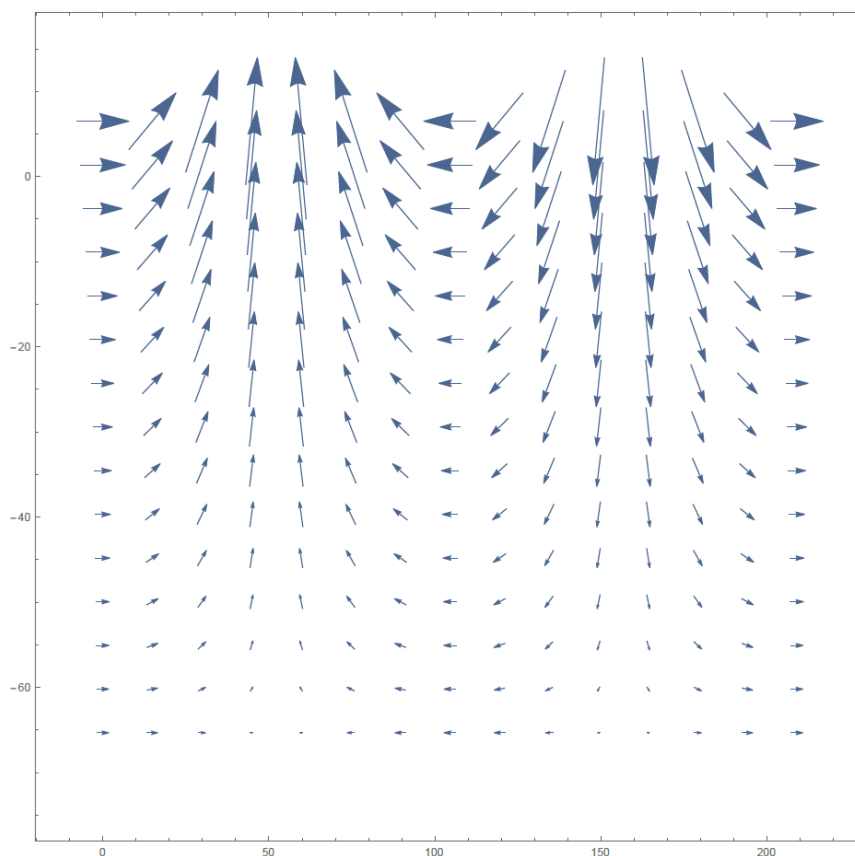
Iz linearizirane Bernoullijeve jednadžbe možemo izvesti izraz za tlak:

$$p = -\rho \left( \frac{\partial \Phi_w}{\partial t} + gz \right) \quad (29)$$

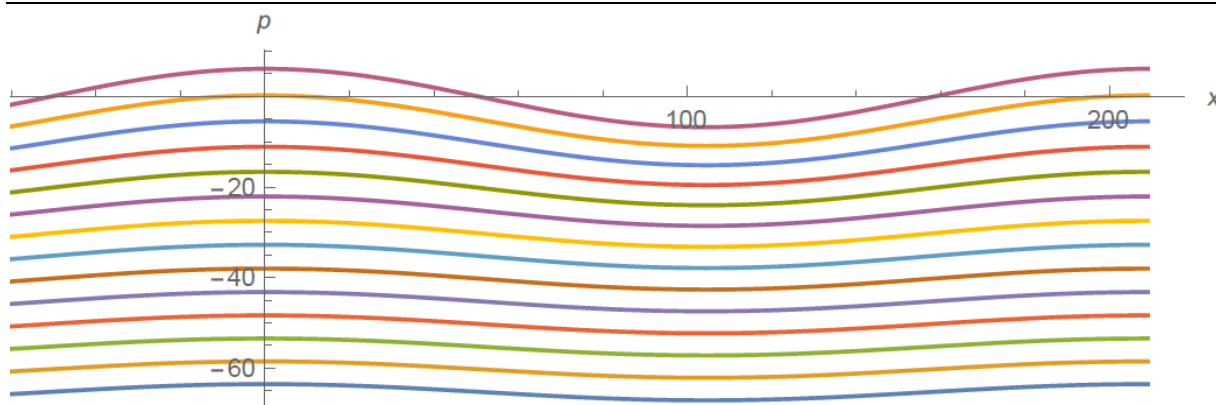
Uvrštavajući u gornju jednadžbu izraz za potencijal brzine (20) deriviran po vremenu  $t$  slijedi:

$$p = -\rho g z + \rho g \zeta_a \frac{\cosh[k(d+z)]}{\cosh(kd)} \cos(kx - \omega t) \quad (30)$$

Iz dobivenog izraza može se zaključiti kako vrijednost tlaka na određenoj dubini varira oko vrijednosti hidrostatskog tlaka. Slika 13 prikazuje kvalitativno kako hidrodinamički tlak zamire sa dubinom, te je dobivena uz pomoć programa Mathematica 10.0. U slučaju duboke vode na dnu bi hidrodinamička komponenta tlaka potpuno nestala te bi postojala komponenta samo hidrostatskog tlaka, dok to u općem slučaju i slučaju plitke vode nije tako što i prikazuje Slika 13. Treba napomenuti da Slika 13 prikazuje bezdimenzionalni tlak u kojem je izraz za tlak  $p$  podjeljen sa  $\rho g$ .



**Slika 12. Vektorsko polje brzina u harmonijskom valu**



Slika 13. Kvalitativni prikaz tlaka u harmonijskom valu

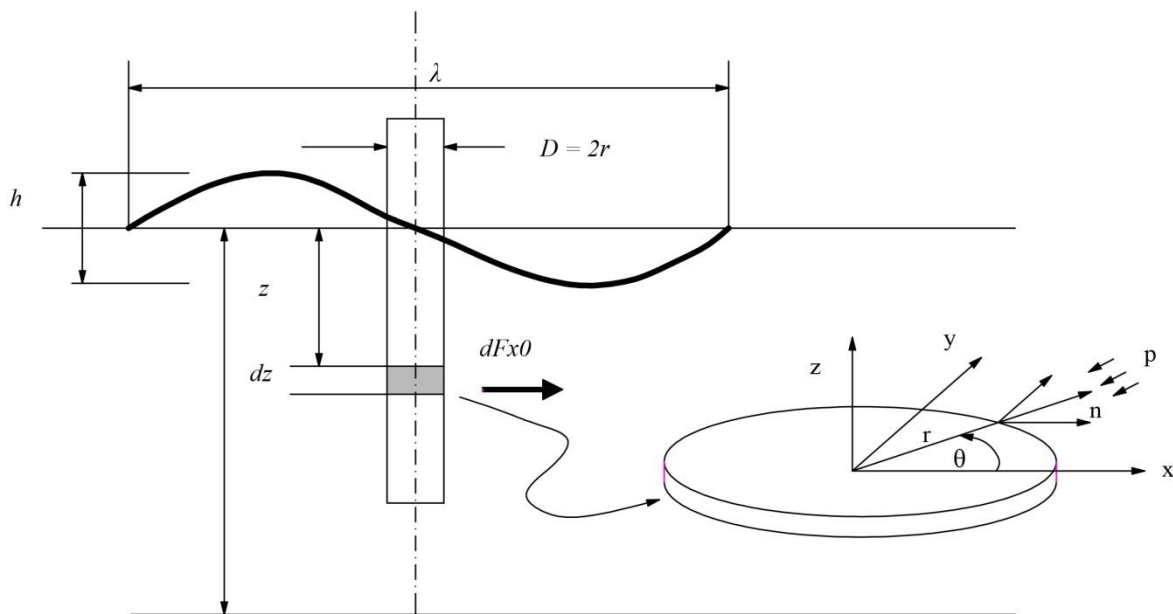
### 3.2. Morisonova jednadžba

U hidromehanici vitkih tijela poput dugih cilindara kružnog poprečnog presjeka, kakvi se često koriste kao temeljni konstrukcijski elementi struktura objekata morske tehnike, jedna od temeljnih jednadžbi za izračunavanje hidrodinamičke sile na takve cilindrične elemente je Morisonova jednadžba.

#### 3.2.1. Pretpostavke i definicije

Prilikom izučavanja hidromehanike vitkih tijela treba naglasiti pretpostavke i definicije za koje teorija vrijedi, tako jedan od temeljnih uvjeta je da promjer  $D$  vitkog cilindra mora biti višestruko manji od duljine vala, uglavnom se uzima da omjer promjera cilindra i duljine vala  $\frac{D}{\lambda}$  bude manji od  $\frac{1}{5}$ . Izvodi se odnose na jediničnu duljinu cilindra, iz čega slijedi da će dobivena sila predstavljati silu po duljini te će se za dobivanje ukupne sile izraz izveden za silu jedinične duljine integrirati po duljini cilindra. Izostanak prostornih promjena u strujanju okolnog fluida u blizini cilindra omogućava opisivanje strujanja cijelog područja opisivanjem strujanja samo jedne karakteristične pozicije koja je u ovom slučaju uzeta u osi cilindra. Strujanje oko diferencijalnog segmenta cilindra promatrat će se kao dvodimenzionalno, na isti način kako se promatralo strujanje u linearnoj valnoj teoriji. Također, proučavaju se komponente sile u smjeru okomitom na os cilindra. Koordinatni sustav odgovara korištenom pri opisivanju linearnog harmonijskog vala, kojem je ishodište na razini mirne vodene površine i pozitivan smjer osi  $z$  je usmjeren prema gore a os  $x$  je usmjerena prema smjeru napredovanja vala. Strujanje oko cilindra odgovara potencijalnom strujanju u području linearnog harmonijskog vala čije karakteristike brzina, ubrzanja i tlaka možemo zapisati već izvedenim jednadžbama (25),(27),(29) iz prethodnog poglavlja.





Slika 14. Kružni isječak za koji se računa hidrodinamička sila

### 3.2.2. Sila inercije

J.E.Morison po kome je jednačba dobila ime, zamislio je „rupu“ zbog prisutnosti cilindra u polju tlakova strujanja, ali je pri tome zanemario činjenicu da je stijenka cilindra nepropusna te je promatrao strujanje nepromijenjeno kao da cilindra nema. Sila koja djeluje na stijenku diferencijalnog presjeka cilindra  $dC$  u smjeru napredovanja vala, tj. u smjeru jediničnog vektora  $\mathbf{i}$  zbog djelovanja polja hidrodinamičkog tlaka  $p_d$ , jednostavno se može dobiti integriranjem tlaka po obodu cilindra  $C$ .

$$dF_{x0} = - \int_0^{2\pi} p_d \mathbf{n} \mathbf{i} dC dz = - \int_0^{2\pi} p_d \cos\theta r d\theta dz \quad (31)$$

Gdje izraz za linearizirani hidrodinamički tlak u harmonijskom valu  $p_0$  prelazeći u cilindrične koordinate glasi:

$$p_d(r, \theta, z; t) \cos\theta = -\rho g \zeta_a \frac{\cosh(z + d)}{\cosh(kd)} \cos(k r \cos\theta - \omega t) \quad (32)$$

Nakon sređivanja harmonijskog dijela podintegralne funkcije, rastavljanjem na sinusni i kosinusni dio te uvođenjem pojednostavljenja zbog pretpostavke relativno velike valne duljine  $\lambda$  u odnosu na promjer  $D = 2r$ , izraz za diferencijalnu silu glasi:

$$dF_{x0} = k g \zeta_a \frac{\cosh(z+d)}{\cosh(kd)} \sin(\omega t) \cdot \rho \pi r^2 dz \quad (33)$$

Kako vrijedi da je:

$$a_{x0}(0,0,z;t) = k g \zeta_a \frac{\cosh(z+d)}{\cosh(kd)} \sin(\omega t) \quad (34)$$

Funkcija koja opisuje ubrzanje  $a_{x0}$  harmonijskog progresivnog vala u središnjoj osi cilindra C (pri  $r = 0$ ), na dubini  $z$  i u trenutku  $t$ , a izraz:

$$dm = \rho \pi r^2 dz \quad (35)$$

Predstavlja masu fluida istisnutog diferencijalnim volumenom visine  $dz$ , diferencijalnu silu  $dF_{x0}$  možemo napisati u skladu sa 2. Newtonovim zakonom kao produkt mase i ubrzanja:

$$dF_{x0} = a_{x0}(0,0,z;t) \cdot dm = \rho \frac{\pi D^2}{4} dz \cdot a_{x0}(0,0,z;t) \quad (36)$$

Kako je fizikalno nemoguće da tekućina prolazi kroz stijenke cilindra, na obodu presjeka cilindra mora se uspostaviti polje dodatnog tlaka čija sila djeluje na razmicanje fluida oko cilindra, pri čemu se mijenja polje brzine koje sada djeluje u suprotnom smjeru od normalne komponente neporemećene brzine. Problem se može razmotriti na način kao da cilindar slobodno giba ubrzanjem jednakog ubrzanju fluida ali suprotnog smjera  $-a_{x0}(0,0,z;t)$ . U tom slučaju zaista ne postoji prolaz tekućine kroz stjenku cilindra. Sila koja djeluje na uronjeno tijelo prisiljavajući ga da se giba s ubrzanjem  $-a_{x0}(0,0,z;t)$  jednaka je:

$$dF_{x0} = -a_{x0}(0,0,z;t) \cdot dm \quad (37)$$

U ovom slučaju je  $dm$  dodatna masa jednaka masi volumena istisnute tekućine. Kako se diferencijalni presjek u stvarnosti ne giba na ovako zamišljen način, Morison je zaključio da sila u gornjoj jednadžbi predstavlja reakciju nepomičnog presjeka na dodatni tlak te je prema tome ukupna diferencijalna sila  $dF_{x0}$  na obodu presjeka C cilindra jednaka:

$$dF_{x0} = a_{x0}(0,0,z;t)dm - (-a_{x0}(0,0,z;t)dm) = \rho C_M \frac{\pi D^2}{4} dz \cdot a_{x0}(z;t) \quad (38)$$

Gdje je:

$C_M \approx 2$  – teoretska vrijednost koeficijent inercijske sile u potencijalnom strujanju

### 3.2.3. Sila otpora

Morison je činjenicu da je strujanje oko presjeka cilindra u valu složenije od idealizirane slike koja počiva na pretpostavci idealne tekućine i bezvrtložnog strujanja uzeo u obzir preko sile otpora proporcionalne kvadratu brzine strujanja  $v_{x0}$ . Sila otpora ima isti smjer kao i brzina strujanja pa se kvadrat brzine zapisuje kao,  $v_{x0} \cdot |v_{x0}|$  zbog zadržavanja prikladnog predznaka. Dobivena jednadžba za silu otpora glasi:

$$dF_{xd} = \frac{1}{2} \rho C_D D dz v_{x0}(z; t) \cdot |v_{x0}(z; t)| \quad (39)$$

Gdje je  $C_D$  pripadni koeficijent otpora, a  $v_{x0}(z; t)$  brzina strujanja u smjeru osi x, u harmonijskom progresivnom valu za središte cilindra osi z:

$$v_{x0}(z; t) = \zeta_a \frac{g k}{\omega} \frac{\cosh[k(z + d)]}{\cosh(kd)} \cos(\omega t) \quad (40)$$

Morisonova jednadžba se temelji na superponiranju inercijske sile u fazi sa ubrzanjem fluida i sile otpora u fazi sa brzinom fluida:

$$F(t) = F_{inercije}(t) + F_{otpora}(t) \quad (41)$$

Iz čega za opći slučaj ukupne sile za cijelu dužinu z cilindra, Morisonovu jednadžbu možemo zapisati:

$$\mathbf{F}_n(\mathbf{r}; t) = \rho \frac{\pi D^2}{4} \mathbf{C}_M \cdot \mathbf{a}_n(\mathbf{r}; t) + \frac{1}{2} \rho D \mathbf{C}_D \cdot \mathbf{v}_n(\mathbf{r}; t) \cdot |\mathbf{v}_n(\mathbf{r}; t)| \quad (42)$$

Gdje je:

$\rho$  – gustoća vode,  $[t/m^3]$

$D$  – promjer elementa na poziciji izračunavanja sile,  $[m]$

$\mathbf{C}_M$  – matrica koeficijenta inercije,  $[-]$

$\mathbf{C}_D$  – matrica koeficijenta otpora,  $[-]$

$\mathbf{v}_n$  –komponenta vektora brzine strujanja u smjeru okomitom (normalnom) na os elementa strukture (uključujući brzinu i valova i morske struje)

$|\mathbf{v}_n|$  – aposolutna vrijednost  $\mathbf{v}_n$

$\mathbf{a}_n = \frac{d\mathbf{v}_n}{dt}$  –komponenta vektora ubrzanja strujanja u smjeru okomitom (normalnom) na os elementa strukture,  $[m/s^2]$

$\mathbf{r}$  –vektor položaja u globalnim koordinatama pozicije izračunavanja sile,  $[m]$

---

$t$  – je vrijeme, [s]

Matrica hidrodinamičkih koeficijenata je definirana u lokalnom koordinatnom sustavu elementa:

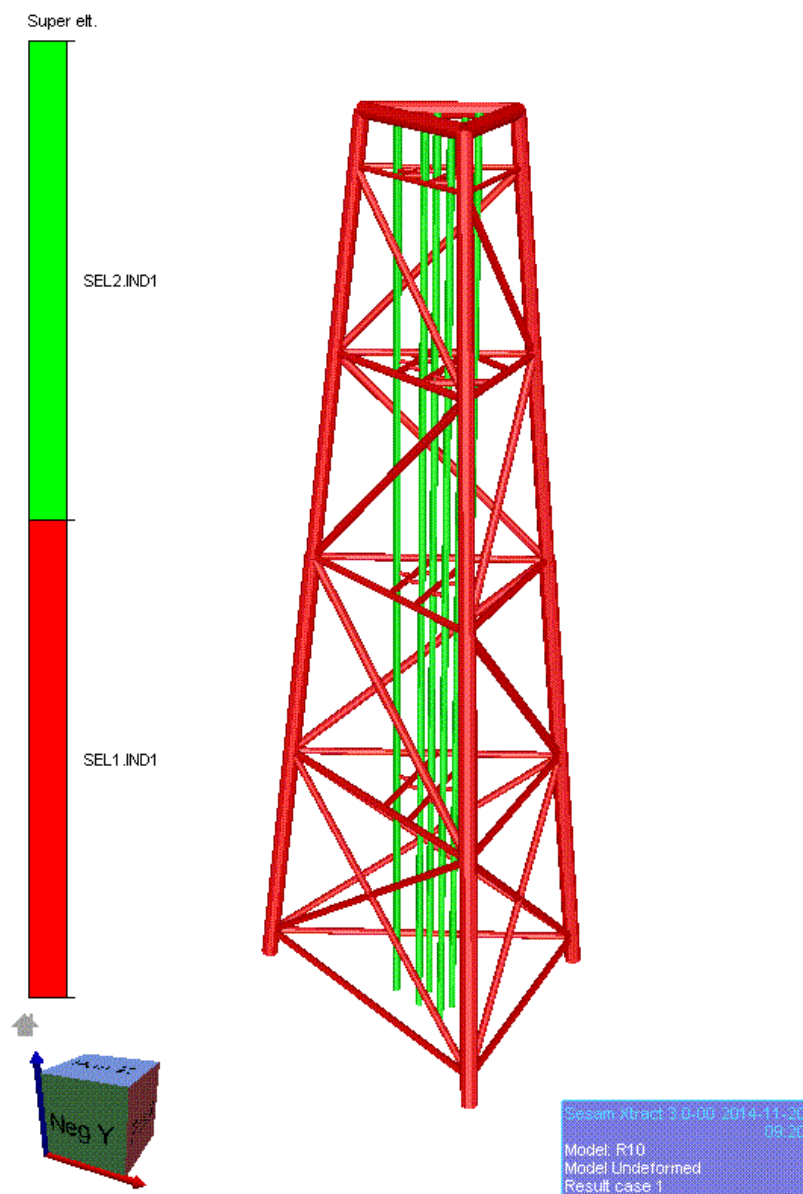
$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} C_x & 0 & 0 \\ 0 & C_y & 0 \\ 0 & 0 & C_z \end{bmatrix} \quad (43)$$

## 4. MODELIRANJE STRUKTURE METODOM KONAČNIH ELEMENATA

### 4.1. Diskretizacija modela rešetkaste platforme konačnim elementima

Modeliranje strukture nepomične rešetkaste naftne platforme konačnim elementima izvedeno je korištenjem programa PREFEM koji punim imenom glasi „Preprocessor for Generation of Finite Element Models“ i dio je programskog paketa SESAM razvijenog u norveškom DNV-u. SESAM se sastoji od niza programa modula podijeljenih po vrsti primjene, od pred procesiranja (engl. preprocessing), računalnih rješavača (engl. solver) do programa namijenjenih analiziranju odziva konstrukcije (engl. postprocessing). Rešetkasta nepomična naftna platforma (engl. Jacket) sastoji se od 3 snažna nosača koja predstavljaju temeljni dio strukture platforme (engl. chords) i dodatnih horizontalnih i dijagonalnih manjih nosača koji sačinjavaju pomoćnu strukturu platforme (engl. bracing) a zajedno sa chordom predstavljaju rešetkastu nosivu strukturu naftne platforme. Na vrhu nosive strukture platforme, nalazi se nadgrađe koje sadrži tri palube na kojima se nalaze procesna postrojenja, stambene nastambe za radnike, dizalica i ostala pomoćna oprema potrebnu za normalno funkcioniranje procesa crpljenja pa zatim i proizvodnje hidrokarbonata iz morskog dna. Zbog velike kompleksnosti nadgrađe platforme nije modelirano konačnim elementima, nego je utjecaj postojanja procesnih postrojenja i nastambi na rešetkastu strukturu platforme uzet u obliku težina koje djeluju u gornja tri čvora izmodelirane strukture, Slika 21. Kao temeljni zadatak statičke analize, prema topologiji strukture što je moguće finije, konačnim elementima je izmodeliran rešetkasti nosivi dio strukture platforme i snop konduktorskih cijevi kojima se nafta i zemni plin dovode iz morskog dna do procesnih postrojenja, Slika 15. Konduktorske cijevi su izmodelirane na način da ne sudjeluju u čvrstoći platforme, već imaju svrhu prijenosa okolišnih horizontalnih opterećenja na rešetkastu strukturu platforme, iz razloga generiranja najkritičnijih opterećenja na strukturu platforme.

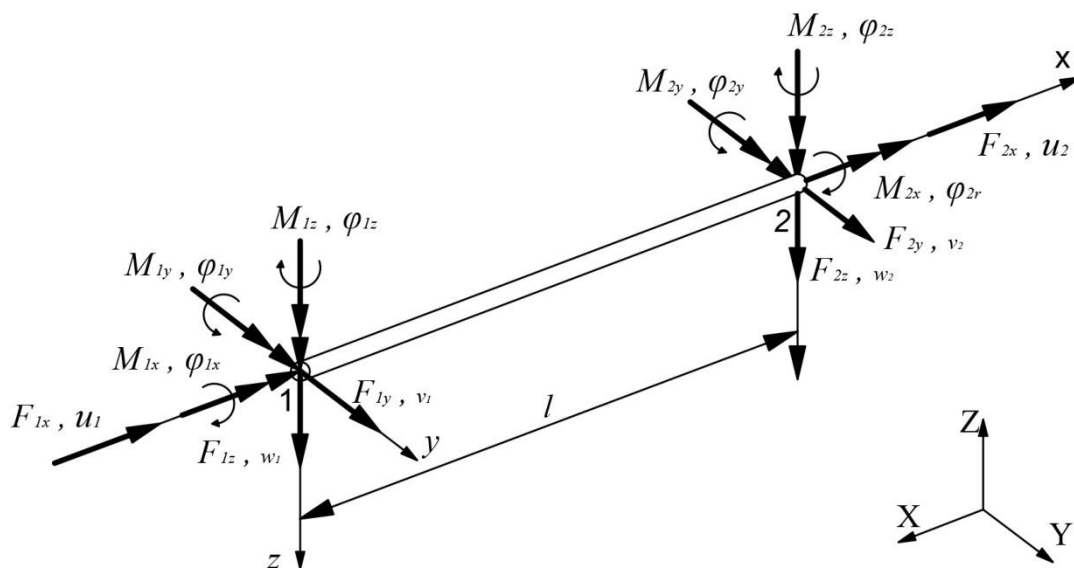
Cijela struktura je modelirana prostornim grednim elementima, koji su u PREFEM-u definirani kao BEAS.



Slika 15. Model rešetkaste strukture platforme

#### 4.2. Prostorni gredni element

Prostorni gredni element je jednodimenzionalno gredni element proizvoljno orijentiran u trodimenzionalni Kartezijevom koordinatnom sustavu. Uz element je uobičajeno vezan lokalni koordinatni sustav pri čemu je jedna os duž elementa, a druge dvije su u ravni poprečnog presjeka. Prostorni gredni element sastoji se od dva čvora sa šest stupnjeva slobode koje sačinjavaju tri komponente pomaka i kutovi zakreta u lokalnom koordinatnom sustavu kojima su pridružene sile i momenti, Slika 16.



Slika 16. Prostorni gredni konačni element, [5]

Matricu krutosti moguće je izvesti superpozicijom matrica krutosti za različito opterećene jednodimenzionalne elemente. Pritom se pretpostavlja da su osi  $y$  i  $z$  lokalnog koordinatnog sustava koje leže u ravnini presjeka ujedno i glavne osi tromosti, a težište poprečnog presjeka poklapa se sa centrom smicanja. Na taj način poprečne sile mogu izazvati samo savijanje, odnosno zbog njihovog djelovanja ne može doći do uvijanja grednog elementa.

Pomoću članova matrice krutosti osno opterećenog osnovnog štapnog elementa, izraza za matricu krutosti štapnog elementa opterećenog na uvijanje i izraza za matricu krutosti osnovnog grednog elementa za slučaj savijanja oko osi  $y$ , te analognog izraza oko osi  $z$ , izvodi se rezultirajuća matrica krutosti za prostorni gredni element. Pritom je prikladno članove pojedinih matrica poredati da odgovaraju vektoru stupnjeva slobode u kojem se prvih šest članova odnosi na prvi čvor, ostali su članovi pridruženi drugom čvoru:

$$\mathbf{V}^T = [u_1 \quad v_1 \quad w_1 \quad \varphi_{1x} \quad \varphi_{1y} \quad \varphi_{1z} \quad u_2 \quad v_2 \quad w_2 \quad \varphi_{2x} \quad \varphi_{2y} \quad \varphi_{2z}] \quad (44)$$

Pripadajuća rezultirajuća matrica krutosti prikazana je relacijom:

$$\begin{aligned}
& \mathbf{K} \\
& = \begin{bmatrix} \frac{AE}{l} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{AE}{l} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 12\frac{EI_z}{l^3} & 0 & 0 & 0 & 6\frac{EI_z}{l^2} & 0 & -12\frac{EI_z}{l^3} & 0 & 0 & 0 & 6\frac{EI_z}{l^2} \\ 0 & 0 & 12\frac{EI_y}{l^3} & 0 & -6\frac{EI_y}{l^2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{GI_T}{l} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{GI_T}{l} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -6\frac{EI_y}{l^2} & 0 & 4\frac{EI_y}{l} & 0 & 0 & 0 & 6\frac{EI_y}{l^2} & 0 & 2\frac{EI_y}{l} & 0 \\ 0 & 6\frac{EI_z}{l^2} & 0 & 0 & 0 & 4\frac{EI_z}{l} & 0 & -6\frac{EI_z}{l^2} & 0 & 0 & 0 & 2\frac{EI_z}{l} \\ -\frac{AE}{l} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{AE}{l} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -12\frac{EI_z}{l^3} & 0 & 0 & 0 & -6\frac{EI_z}{l^2} & 0 & 12\frac{EI_z}{l^3} & 0 & 0 & 0 & -6\frac{EI_z}{l^2} \\ 0 & 0 & -12\frac{EI_y}{l^3} & 0 & 6\frac{EI_y}{l^2} & 0 & 0 & 0 & 12\frac{EI_y}{l^3} & 0 & 6\frac{EI_y}{l^2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{GI_T}{l} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{GI_T}{l} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -6\frac{EI_y}{l^2} & 0 & 2\frac{EI_y}{l} & 0 & 0 & 0 & 6\frac{EI_y}{l^2} & 0 & 4\frac{EI_y}{l} & 0 \\ 0 & 6\frac{EI_z}{l^2} & 0 & 0 & 0 & 2\frac{EI_z}{l} & 0 & -6\frac{EI_z}{l^2} & 0 & 0 & 0 & 4\frac{EI_z}{l} \end{bmatrix} \quad (45)
\end{aligned}$$

Prostorni gredni elementi su proizvoljno orijentirani u globalnom koordinatnom sustavu, za izvođenje globalne jednadžbe konačnih elemenata potrebno je provesti transformaciju stupnjeva slobode. Matrica transformacije za prikazani prostorni gredni element s 12 stupnjeva slobode jednaka je:

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} \mathbf{T}_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \mathbf{T}_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \mathbf{T}_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \mathbf{T}_4 \end{bmatrix} \quad (46)$$

Gdje su  $\mathbf{T}_1 \dots \mathbf{T}_4$  jednake kvadratne submatrice trećeg reda čiji su članovi kosinusi smjera proizvoljnog čvora  $i$  trodimenzionalnog konačnog elementa čiji su stupnjevi slobode komponente pomaka  $u_i, v_i, w_i$  u lokalnom koordinatnom sustavu (x,y,z), njihova veza sa stupnjevima slobode  $\bar{u}_i, \bar{v}_i, \bar{w}_i$  u pravcu globalnog koordinatnog sustava (X;Y;Z) može se prikazati:

$$\begin{bmatrix} u_i \\ v_i \\ w_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(x, X) & \cos(x, Y) & \cos(x, Z) \\ \cos(y, X) & \cos(y, Y) & \cos(y, Z) \\ \cos(z, X) & \cos(z, Y) & \cos(z, Z) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{u}_i \\ \bar{v}_i \\ \bar{w}_i \end{bmatrix} \quad (47)$$



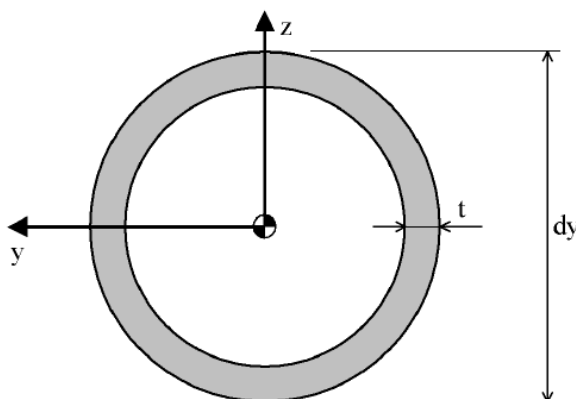
### 4.3. Svojstva materijala i poprečnih presjeka

Modeliranje konstrukcije u PREFEM-u započinje definiranjem linija od kojih svaka predstavlja određeni nosač konstrukcije. Linija je definirana točkama koje se nalaze u sjecištima dvaju ili više nosača. Kada je čitava konstrukcija izmodelirana, naredbom MESH ALL linijama se pridjeljuju svojstva grednih konačnih elemenata definiranih dvama čvorovima na sjecištu elementa konstrukcije. Zavisno o položaju na strukturi svakom konačnom elementu se pridružuje definirani poprečni presjek sa svojstvima materijala. Korišten je konstrukcijski čelik čija su mehanička svojstva definirana pravilima API RP-WSD prikazana u Tablica 3.

**Tablica 3. Svojstva materijala**

<i>Materijal</i>	<b>API 5L X52 SR5</b>
Youngov modul elastičnosti, $[kN/m^2]$	205000
Modul smicanja, $[kN/m^2]$	80000
Poissonov koeficijent, $[-]$	0.30
Koeficijent toplinske dilatacije, $[1/^\circ C]$	12E-05
Gustoća čelika, $[t/m^3]$	7.850
Najmanja dopuštena granica tečenja $F_y, [kN/m^2]$	360
Najmanja dopuštena granica razvlačenja, $F_e, [kN/m^2]$	455

Rešetkasta struktura je sastavljena od cilindričnih elemenata s 12 različitih poprečnih presjeka ovisno o njihovoj duljini i poziciji u konstrukciji. Svi poprečni presjeci su definirani u nacrtu strukture koja se nalazi u prilogu [III] diplomskog rada.



**Slika 17. Poprečni presjek cilindra definiran u PREFEM-u, [4]**

Karakteristike poprečnih presjeka su navedene u sljedećim tablicama:

**Tablica 4. Geometrijske karakteristike poprečnih presjeka (S1-S3)**

Cilindrični poprečni presjek (engl. PIPE)	S1	S2	S3
Vanjski promjer cijevi $D_y, [m]$	0.3556	0.4064	0.5080
Debljina stijenke cijevi $t_s, [m]$	0.01270	0.0127	0.01905
Faktor smične površine, u smjer Y, $S_{FY}$	1.000E+00	1.000E+00	1.000E+00
Faktor smične površine, u smjer Z, $S_{FZ}$	1.000E+00	1.000E+00	1.000E+00
Površina poprečnog presjeka $A, [m^2]$	0.01368	0.01571	0.02926
Polarni moment tromosti oko središta, $I_x [m^4]$	4.027E-04	6.093E-04	1.752E-03
Aksijalni moment tromosti oko osi Y, $I_Y, [m^4]$	2.014E-04	3.047E-04	8.758E-04
Aksijalni moment tromosti oko osi Z, $I_Z, [m^4]$	2.014E-04	3.047E-04	8.758E-04
Devijacijski moment tromosti $I_{YZ}, [m^4]$	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
Minimalni polarni moment otpora $W_{X,MIN}, [m^3]$	2.265E-03	2.999E-03	6.896E-03
Minimalni moment otpora oko osi Y, $W_{Y,MIN}, [m^3]$	1.132E-03	1.499E-03	3.448E-03
Minimalni moment otpora oko osi Z, $W_{Z,MIN}, [m^3]$	1.132E-03	1.499E-03	3.448E-03

**Tablica 5. Geometrijske karakteristike poprečnih presjeka (S4-S6)**

Cijevni poprečni presjek (engl. PIPE)	S4	S5	S6
Vanjski promjer cijevi $D_y, [m]$	0.6096	0.7500	0.7000
Debljina stijenke cijevi $t_s, [m]$	0.0127	0.02500	0.02000
Faktor smične površine, u smjer Y, $S_{FY}$	1.000E+00	1.000E+00	1.000E+00
Faktor smične površine, u smjer Z, $S_{FZ}$	1.000E+00	1.000E+00	1.000E+00
Površina poprečnog presjeka $A, [m^2]$	0.02382	0.05694	0.04273
Polarni moment tromosti, $I_x [m^4]$	2.122E-03	7.491E-03	4.943E-03
Aksijalni moment tromosti oko osi Y, $I_Y, [m^4]$	1.061E-03	3.746E-03	2.472E-03
Aksijalni moment tromosti oko osi Z, $I_Z, [m^4]$	1.061E-03	3.746E-03	2.472E-03
Devijacijski moment tromosti $I_{YZ}, [m^4]$	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00

Minimalni polarni moment otpora $W_{X,MIN}$ , [ $m^3$ ]	6.963E-03	1.998E-02	1.412E-02
Minimalni moment otpora oko osi Y, $W_{Y,MIN}$ , [ $m^3$ ]	3.481E-03	9.988E-03	7.062E-03
Minimalni moment otpora oko osi Z, $W_{Z,MIN}$ , [ $m^3$ ]	3.481E-03	9.988E-03	7.062E-03

**Tablica 6. Geometrijske karakteristike poprečnih presjeka (S7-S9)**

Cijevni poprečni presjek (engl. PIPE)	S7	S8	S9
Vanjski promjer cijevi $D_y$ , [m]	0.6096	1.400	1.400
Debljina stijenke cijevi $t_s$ , [m]	0.01905	0.0400	0.0250
Faktor smične površine, u smjer Y, $S_{FY}$	1.000E+00	1.000E+00	1.000E+00
Faktor smične površine, u smjer Z, $S_{FZ}$	1.000E+00	1.000E+00	1.000E+00
Površina poprečnog presjeka $A$ , [ $m^2$ ]	0.03534	0.1709	0.1080
Polarni moment tromosti oko središta, $I_x$ [ $m^4$ ]	3.085E-03	7.909E-02	5.106E-02
Aksijalni moment tromosti oko osi Y, $I_y$ , [ $m^4$ ]	1.542E-03	3.955E-02	2.553E-02
Aksijalni moment tromosti oko osi Z, $I_z$ , [ $m^4$ ]	1.542E-03	3.955E-02	2.553E-02
Devijacijski moment tromosti $I_{YZ}$ , [ $m^4$ ]	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
Minimalni polarni moment otpora $W_{X,MIN}$ , [ $m^3$ ]	1.012E-02	1.130E-01	7.294E-02
Minimalni moment otpora oko osi Y, $W_{Y,MIN}$ , [ $m^3$ ]	5.060E-03	5.650E-02	3.647E-02
Minimalni moment otpora oko osi Z, $W_{Z,MIN}$ , [ $m^3$ ]	5.060E-03	5.650E-02	3.647E-02

**Tablica 7. Geometrijske karakteristike poprečnih presjeka (S10-S12)**

Cijevni poprečni presjek (engl. PIPE)	S10	S11	S12
Vanjski promjer cijevi $D_y$ , [m]	1.200	1.200	0.5080
Debljina stijenke cijevi $t_s$ , [m]	0.0250	0.0300	0.0127
Faktor smične površine, u smjer Y, $S_{FY}$	1.000E+00	1.000E+00	1.000E+00
Faktor smične površine, u smjer Z, $S_{FZ}$	1.000E+00	1.000E+00	1.000E+00
Površina poprečnog presjeka $A$ , [ $m^2$ ]	0.09228	0.1103	0.01976
Polarni moment tromosti oko središta, $I_x$ [ $m^4$ ]	3.187E-02	3.776E-02	1.213E-03

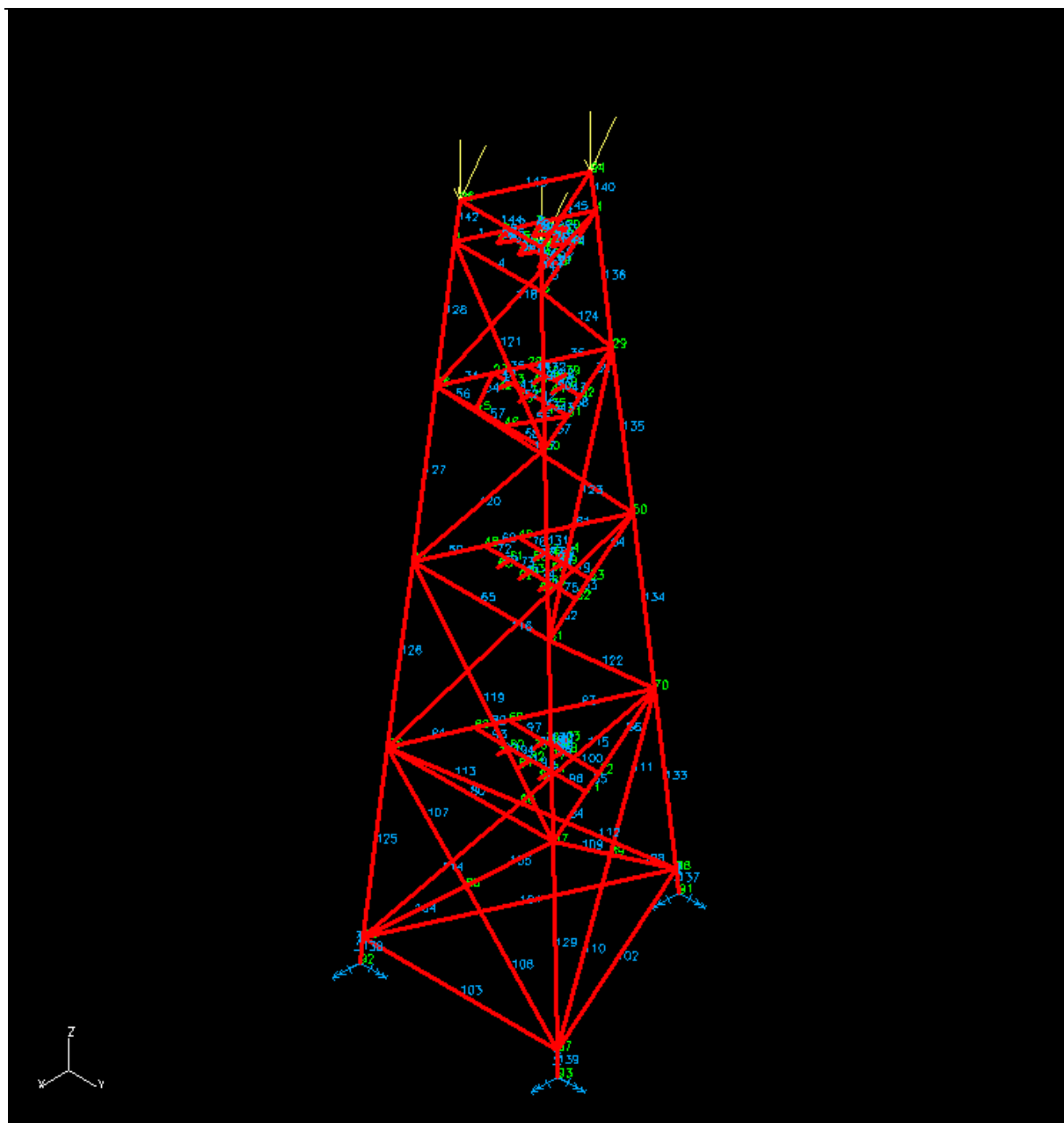
Aksijalni moment tromosti oko osi Y, $I_Y$ , [ $m^4$ ]	1.593E-02	1.888E-02	6.064E-04
Aksijalni moment tromosti oko osi Z, $I_Z$ , [ $m^4$ ]	1.593E-02	1.888E-02	6.064E-04
Devijacijski moment tromosti $I_{YZ}$ , [ $m^4$ ]	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
Minimalni polarni moment otpora $W_{X,MIN}$ , [ $m^3$ ]	5.311E-02	6.294E-02	4.775E-03
Minimalni moment otpora oko osi Y, $W_{Y,MIN}$ , [ $m^3$ ]	2.656E-02	3.147E-02	2.387E-03
Minimalni moment otpora oko osi Z, $W_{Z,MIN}$ , [ $m^3$ ]	2.656E-02	3.147E-02	2.387E-03

#### 4.4. Model superelemenata

Model strukture se može sastojati od samo jednog superelementa ili njih više koji se spajaju, koristeći Sesamov modul PRESEL, u novi superelement više razine. Superelementi su definirani svojim brojem, razinom (engl. level) i indeksom koji označava redni broj pojavljivanja. Odnosno jedan te isti superelement se može pojaviti više puta unutar superelementa više razine. Svaki podelement spojene strukture u superelement više razine, definiran je u superelementu prve razine kojem pripada. Također korisna opcija modeliranja konstrukcije superelementima je mogućnost isključivanja pojedinog superelementa iz računanja valnih opterećenja, primjerice ako se određeni superelement nalazi iznad zone zapljuskivanja valova. Superelementi prve razine se stvaraju u PREFEMU-u ili nekom drugom Sesamovom modulu za modeliranje. Tako, model rešetkaste strukture platforme predstavlja superelement 1, i on obuhvaća sve potrebne podatke od rubnih uvjeta, broja elemenata i čvorova, stupnjeva slobode i opterećenja Slika 18.

Podaci o superelementu 1:

- 145 podelemenata (engl. subelements)
- 96 čvorova
- 18 spriječenih stupnjeva slobode
- 510 unutarnjih (engl. internal) stupnjeva slobode
- 48 zadržanih (engl. retained) stupnjeva slobode
- 576 ukupno stupnjeva slobode
- 38 slučajeva opterećenja



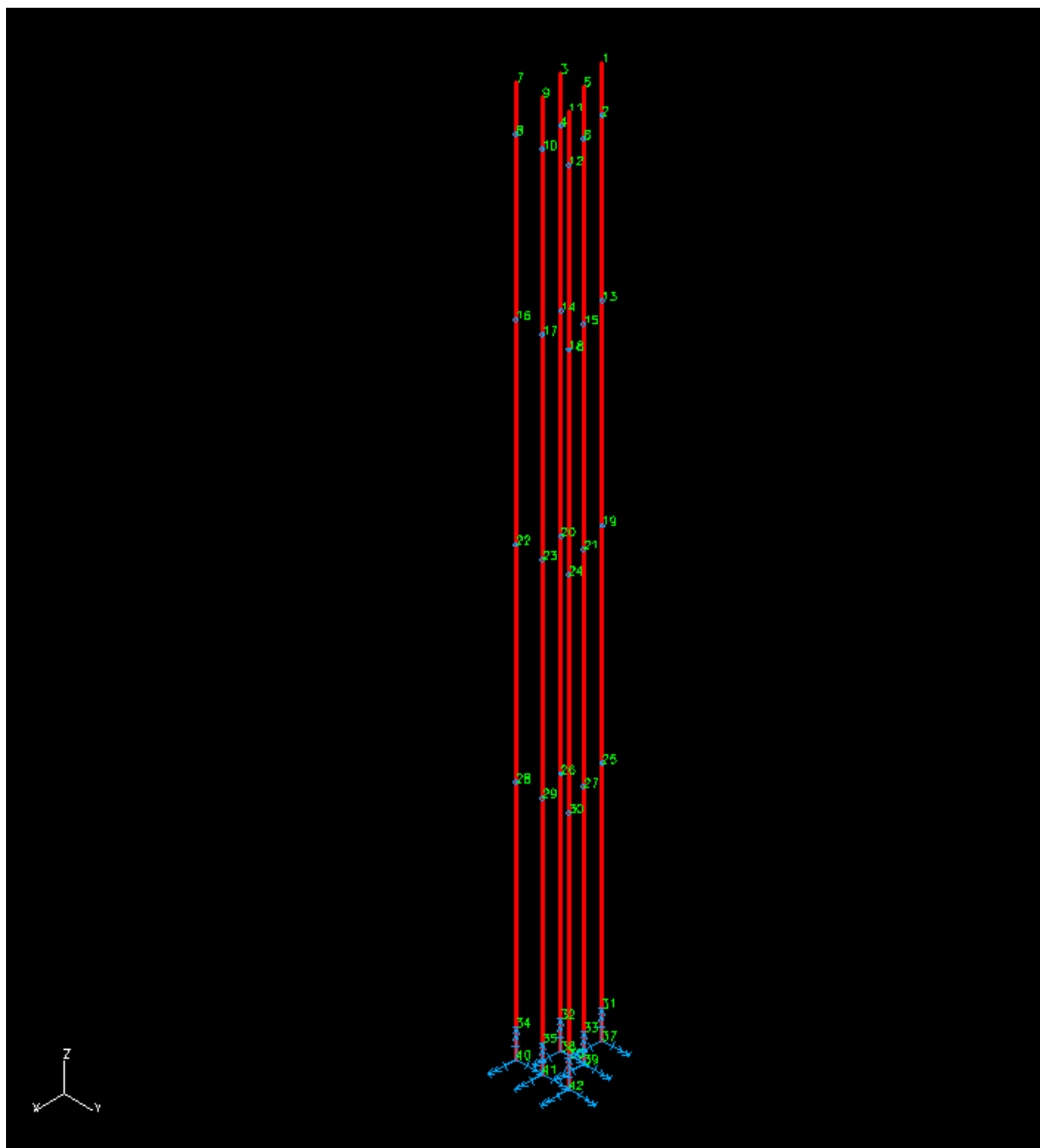
**Slika 18. Superelement 1**

Konduktorske cijevi su modelirane kao zaseban superelement 2, Slika 19.

Podaci o superelementu 2:

- 36 podelemenata
- 42 čvora
- 36 spriječenih stupnjeva slobode
- 168 unutarnjih stupnjeva slobode
- 48 zadržanih stupnjeva slobode

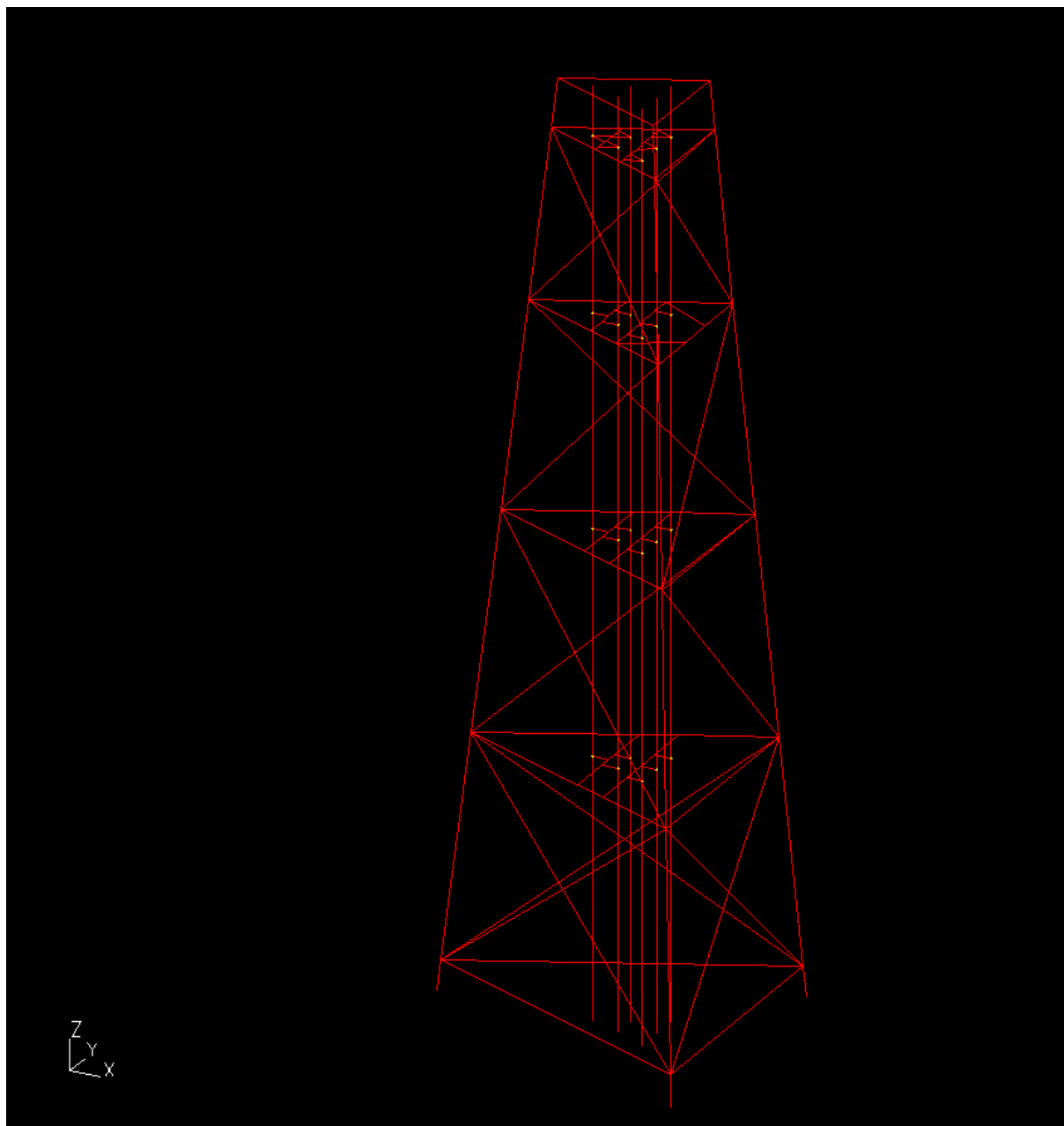
- 252 ukupna stupnja slobode
- 25 slučajeva opterećenja



**Slika 19. Superelement 2**

Superelementi 1 i 2 su superelementi iste prve razine. Korištenjem programa PRESEL spajaju se u superelement druge razine, superelement 10. 48 zadržanih stupnjeva slobode superelementa 1 i 2 proizlazi iz takozvanih superčvorova, kojima se spajaju dva superelementa niže razine u jedan više, na sljedećoj slici prikazani žutom bojom, Slika 20.

Superelement 10 sadrži 24 superčvora, kojima su spriječeni samo horizontalni stupnjevi slobode u smjeru osi X i Y.



**Slika 20. Superelement 10**

U PRESEL-u se osim spajanja superelemenata nižih razina u više, vrši i stvaranje kombinacija opterećenja za različite slučajeve opterećenja. Više o kombinacijama opterećenja u sljedećem poglavlju 5. modeliranje opterećenja.

Podaci superelementa 10:

- 2 podelementa
- 24 čvora

- 48 unutarnjih stupnjeva slobode
- 48 ukupno stupnjeva slobode
- 12 slučajeva opterećenja

#### 4.5. Metoda rješavanja sustava korištena u programu SESTRA

Princip korištenja superelemenata se temelji na redukciji sustava jednadžbi podmodela (superelemenata niže razine), što se ostvaruje eliminiranjem unutarnjih slobodnih čvorova iz sustava jednadžbi, zadržavajući stupnjeve slobode samo superčvorova podmodela. Ako zamislimo dva superelementa niže razine A i B koja su spojena u jedan superelement više razine C, njihove matrice krutosti  $K$ , vektore pomaka  $r$  i vektore opterećenja  $R$  možemo označiti:

- $K_A, r_A, R_A$  za superelement A
- $K_B, r_B, R_B$  za superelement B

Želimo ostvariti redukciju za unutarnje stupnjeve slobode oba superelementa ( $r_{Ai}$  i  $r_{Bi}$ ). Sljedeći sustav jednadžbi predstavlja jednadžbu ravnoteže jednog od superelemenata A ili B zbog jednostavnosti preskočit će se pisanje indeksa A odnosno B:

$$Kr = R \quad (48)$$

Jednadžbu možemo zapisati i u podijeljenom obliku sortiranjem svih stupnjeva slobode  $r$  na način da svi unutarnji stupnjevi slobode imaju oznaku  $i$  a super stupnjevi slobode  $s$ :

$$\begin{bmatrix} K_{ii} & K_{is} \\ K_{is}^T & K_{ss} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_i \\ r_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_i \\ R_s \end{bmatrix} \quad (49)$$

Ako gornji izraz zapišemo kao dvije odvojene jednadžbe:

$$K_{ii}r_i + K_{is}r_s = R_i \quad (50)$$

$$K_{is}^T r_i + K_{ss}r_s = R_s \quad (51)$$

Ako izlučimo  $r_i$ :

$$r_i = -K_{ii}^{-1}K_{is}r_s + K_{ii}^{-1}R_i \quad (52)$$

Uvrštavanjem u drugu jednadžbu:

$$(K_{ss} - K_{is}^T K_{ii}^{-1} K_{is})r_s = R_s - K_{is}^T K_{ii}^{-1} R_i \quad (53)$$

Ili:



$$\mathbf{k} \mathbf{r}_s = \mathbf{F} \quad (54)$$

Gdje je:

$$\mathbf{k} = \mathbf{K}_{ss} - \mathbf{K}_{is}^T \mathbf{K}_{ii}^{-1} \mathbf{K}_{is} \quad (55)$$

$$\mathbf{F} = \mathbf{R}_s - \mathbf{K}_{is}^T \mathbf{K}_{ii}^{-1} \mathbf{R}_i \quad (56)$$

Kada se ova operacija provede za oba superelementa A i B, njihove se matrice mogu reducirati:

$$\begin{aligned} \mathbf{K}_A &\rightarrow \mathbf{k}_A \\ \mathbf{r}_A &\rightarrow \mathbf{r}_{As} \\ \mathbf{R}_A &\rightarrow \mathbf{F}_A \\ \mathbf{K}_B &\rightarrow \mathbf{k}_B \\ \mathbf{r}_B &\rightarrow \mathbf{r}_{Bs} \\ \mathbf{R}_B &\rightarrow \mathbf{F}_B \end{aligned} \quad (57)$$

Kada su superelementi spregnuti, proizlazi:

$$\mathbf{r}_{As} = \mathbf{r}_{Bs} = \mathbf{r}_s \quad (58)$$

Što znači da oba superelementa A i B pridonose sa krutošću i opterećenjima u superčvoru. Reducirana krutost i opterećenje se mogu posljedično dodati:

$$(\mathbf{k}_A + \mathbf{k}_B) \mathbf{r}_s = (\mathbf{F}_A + \mathbf{F}_B) \quad (59)$$

Ova jednadžba predstavlja jednadžbu ravnoteže za sveukupni model izražen preko stupnjeva slobode (pomaka) superelementa najviše razine. Rješavanjem ove jednadžbe dobija se  $\mathbf{r}_s$ . Uvrštavanjem  $\mathbf{r}_s$  u izraz za  $\mathbf{r}_i$  dolazimo do unutarnjih pomaka superelemenata A i B:

$$\mathbf{r}_{Ai} = -\mathbf{K}_{Aii}^{-1} \mathbf{K}_{Ais} \mathbf{r}_s + \mathbf{K}_{Aii}^{-1} \mathbf{R}_{Ai} \quad (60)$$

$$\mathbf{r}_{Bi} = -\mathbf{K}_{Bii}^{-1} \mathbf{K}_{Bis} \mathbf{r}_s + \mathbf{K}_{Bii}^{-1} \mathbf{R}_{Bi} \quad (61)$$

Ovaj postupak se naziva povratna supstitucija (engl. retracking).

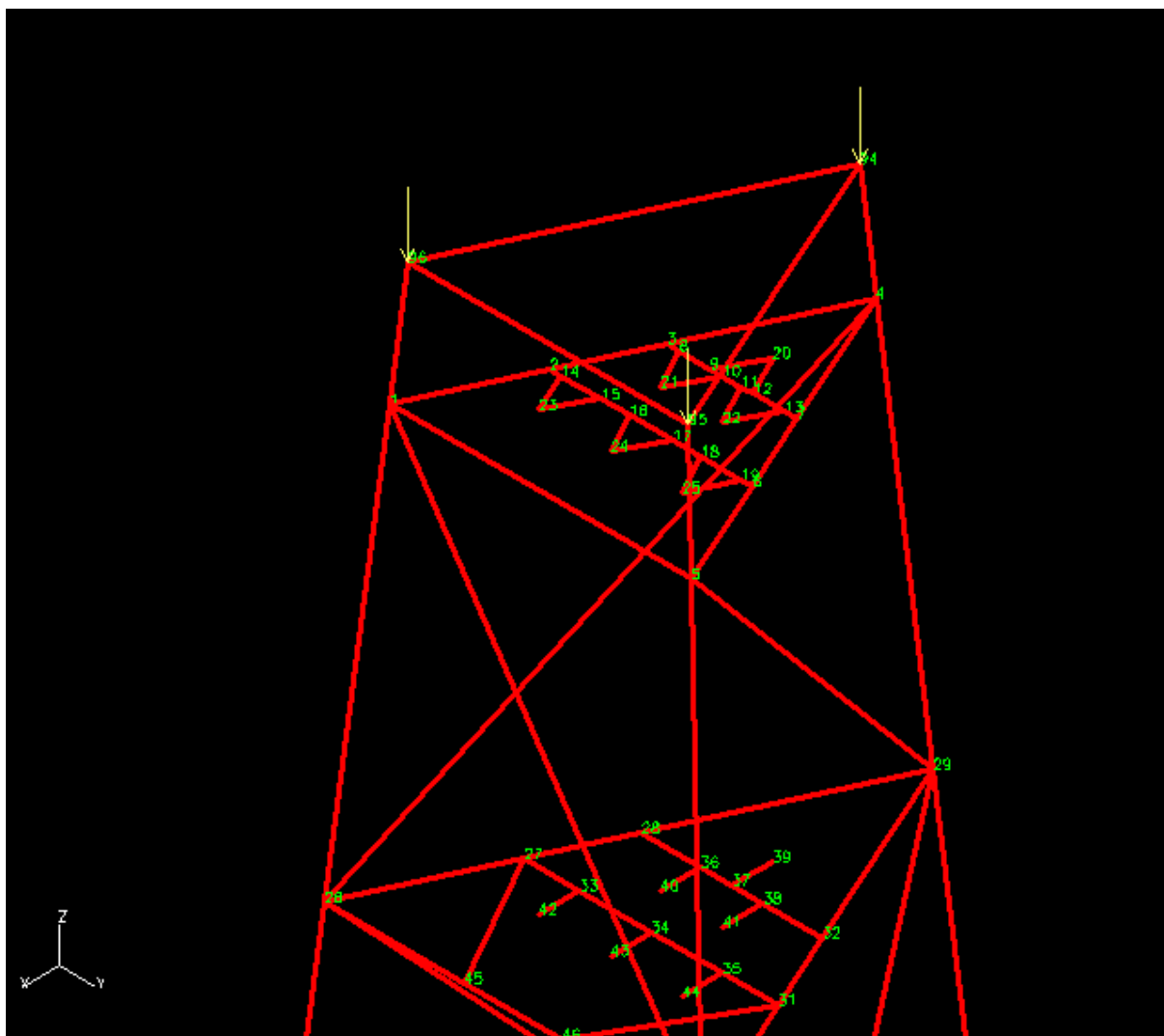
Rješavač kojim se služi SESTRA za izračunavanje zove se Multifront. Za detaljnije informacije o Multifrontu konzultirati literaturu [8].

## 5. MODELIRANJE OPTEREĆENJA

### 5.1. Opterećenja težinama

Opterećenja od vlastitih težina procesnih postrojenja i nadgrađa na konstrukciju su modelirana kao koncentrirane sile u tri čvora na vrhu strukture usmjerena u negativnom smjeru globalne osi Z i iznose:

- Težina čelika rešetkaste strukture izračunata programom SESTR: 4084 kN
- Težina čelika konduktorskih cijevi izračunata programom SESTR: 1193 kN
- Težina cjelokupne opreme: 8512 kN
- Težina postrojenja: 11821 kN



Slika 21. Koncentrirane sile težina u čvorovima prikazane u Prefem-u

## 5.2. Opterećenje vjetra

Ulazni podaci za računanje sile vjetra na konstrukciju najčešće su izmjerene vrijednosti brzine vjetra. Kako je ranije objašnjeno podaci o brzini vjetra se dijele s obzirom na vremensko trajanje iznosa brzine vjetra na stalnu brzinu vjetra koja puše dulje od jedne minute i brzinu udara vjetra čije trajanje je kraće od minute. Prema tome izmjereni podaci su prikazani u tablici:

**Tablica 8. Izmjereni podaci o brzini vjetra**

Trajanje brzine vjetra	Brzina vjetra izmjerena na 10 m iznad mirne razine vode [m/s]	
	1 godina	100 godina
Povratni period		
Brzina u trajanju od 1 [min]	37.0	52.0
Udari u trajanju od 3 (s)	45.0	64.0

Opterećenje vjetrom je računato kao horizontalne sile koje djeluju uzduž globalnih koordinatnih osi X i Y. Varijacija profila vjetra po visini je uzeta u obzir prema jednadžbi koju preporučuje API. Sile je izračunata po jednadžbi  $F = \left(\frac{1}{2}\rho_z\right) u^2 C_s A$ .

Gdje je koeficijent oblika  $C_s = 1.0$  uzet za ukupnu projiciranu površinu, a projicirane površina nadgrađa su:

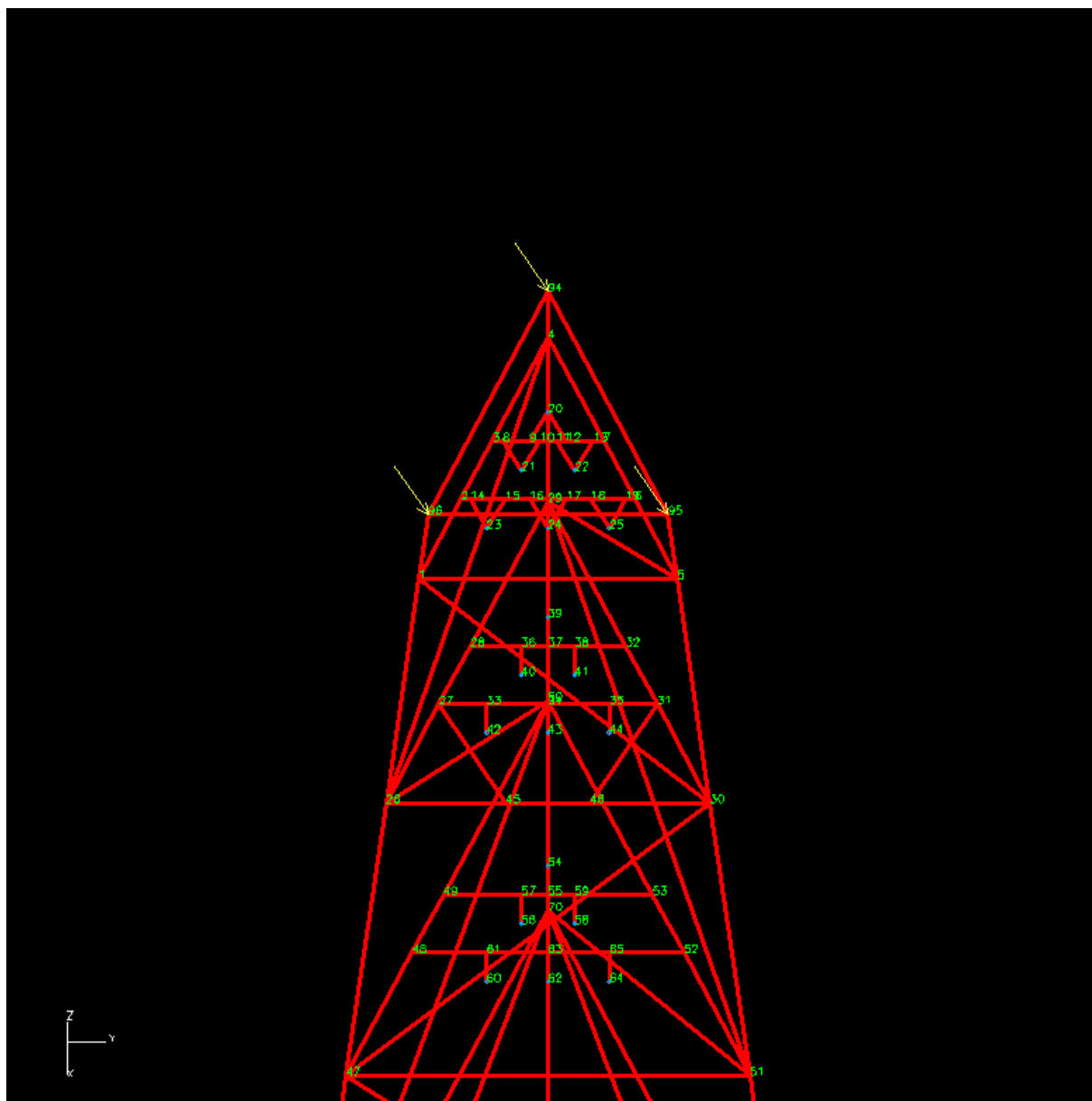
- U smjeru osi X: 160 [m<sup>2</sup>]
- U smjeru osi Y: 152 [m<sup>2</sup>]

Iz čega proizlaze iznosi za sile vjetra:

**Tablica 9. Izračunate sile vjetra u smjeru osi X i Y**

Opis stanja opterećenja	Sila vjetra [kN]		
	X	Y	Z
Povratni period od 1 godine u smjeru osi X	296.47	-	-
Povratni period od 1 godine u smjeru osi Y	-	304.81	-
Povratni period od 100 godina u smjeru osi X	591.65	-	-
Povratni period od 100 godina u smjeru osi Y		609.57	

Horizontalne sile vjetra modeliraju se kao koncentrirane sile i djeluju u tri vršna čvora strukture platforme kao i težine nadgrađa i opreme, vektorski su projicirane u smjeru napredovanja valova, te zajedno sa silom vala i silom morske struje sačinjavaju kombinaciju opterećenja na strukturu, ovisno o kutu nailaska. Slika 22 prikazuje jedan primjer djelovanja sile vjetra u čvorovima konstrukcije.



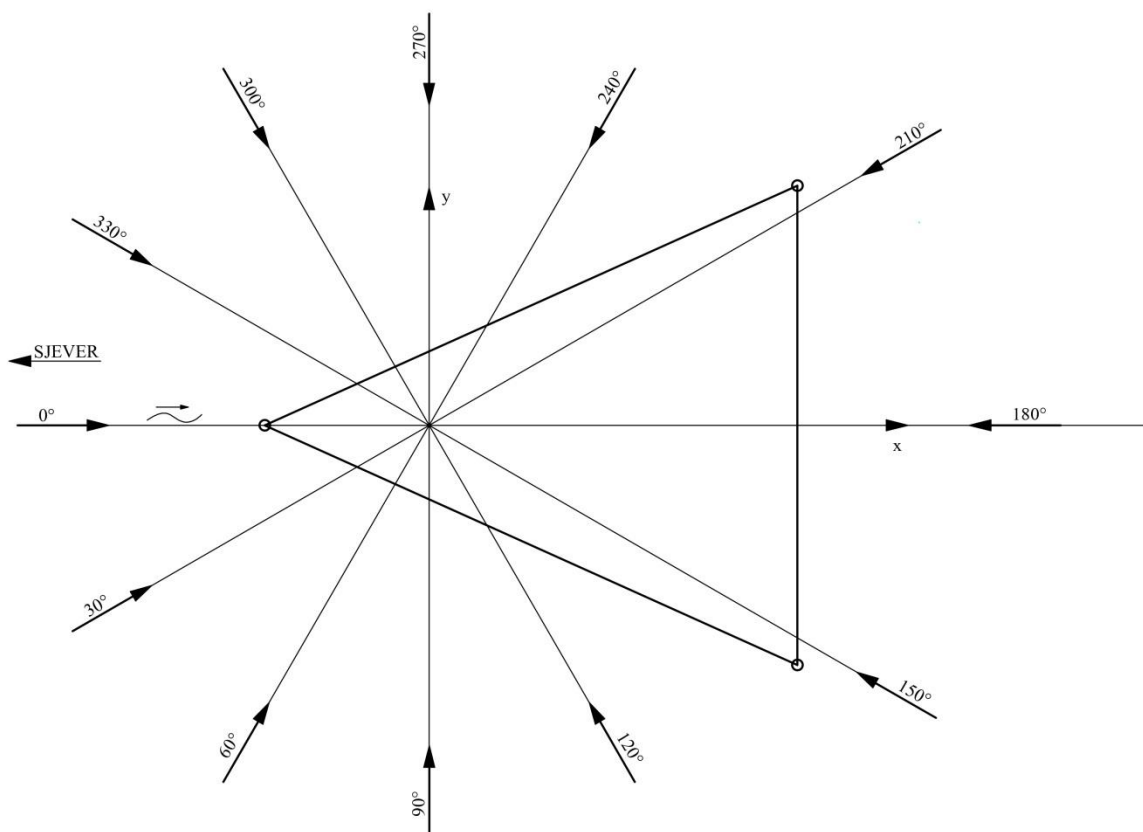
Slika 22. Djelovanje koncentrirane sile vjetra u čvorovima u smjeru nailaska od  $30^\circ$

### 5.3. Opterećenja valova

U 2. i 3. poglavlju je objašnjena fizikalna podloga i principi računanja hidrodinamičkih sila koje iz nje proizlaze za sva okolišna opterećenja ključna pri projektiranju pučinskih

rešetkastih objekata morske tehnike. Zbog toga je u ovom poglavlju dat pregled ulaznih podataka iz kojih se uz korištenje programa WAJAC modeliraju opterećenja.

Jedan od prvih ulaznih parametara prilikom korištenja programa WAJAC je udaljenost morskog dna (engl. Mudline) u odnosu na mirnu morsku površinu, odnosno definiramo dubinu na koju je postavljena platforma, i ona u ovom slučaju iznosi  $d = 65.33 \text{ m}$ . Kako je globalni koordinatni sustav postavljen u odnosu na geografski sjever prikazuje Slika 23.



**Slika 23. Globalni koordinatni sustav i smjer nailaska valova**

Valni parametri relevantni za statičku analizu su valna visina, valni period, smjer nailaska vala na strukturu pri čemu su podaci generirani i za povratni period od 1 godine što odgovara uvjetima službe platforme, i za povratni period od 100 godina što predstavlja kritične uvjete opterećenja koji rezultiraju najvećim naprezanjima na strukturu. Smjer nailaska valova je definiran kutom koji zatvara pozitivan smjer globalne osi X i smjer napredovanja vala, te je mjereno obrnuto od gibanja kazaljke na satu. Ekstremne i operativne vrijednosti valnih parametara su prikazane u Tablica 10:

**Tablica 10. Podaci o valovima**

	Povratni period od 1 godine		Povratni period od 100 godina	
Smjer napredovanja $\beta$ [°]	$H_{MAX}$ [m]	$T_{MAX}$ [s]	$H_{MAX}$ [m]	$T_{MAX}$ [s]
0	6.49	8.17	10.75	10.53
30	7.95	9.05	12.96	11.56
60	7.20	8.61	12.21	11.22
90	6.06	7.90	10.75	10.53
120	5.98	7.85	10.08	10.19
150	5.59	7.59	9.99	10.14
180	5.11	7.26	10.02	10.16
210	4.84	7.06	8.98	9.61
240	4.79	7.02	9.14	9.71
270	4.73	6.98	9.71	10.00
300	3.96	6.39	9.95	10.13
330	5.29	7.39	10.06	10.18

Iako su valna opterećenja u stvarnosti dinamičke prirode, Wajac prilikom njihovog računanja val zaustavlja u vremenskim intervalima ili u ovisnosti o faznom kutu valnog ciklusa, te pri tom trenutku računa silu na strukturu. Ta se metoda naziva metodom projektnog vala. Matematički model korišten za izračunavanje elevacije vala, valne kinematike i tlaka je Stokesova teorija 5. reda, koja u usporedbi sa linearnom valnom teorijom bolje opisuje strmiye valove u području srednjih dubina. Strukturalna analiza je provedena za sve valne visine, pridružene periode i smjerove nailaska koji rezultiraju najvećom horizontalnom silom i prekretnim momentom, za sve fазne pomake u razmaku od 5 stupnjeva. Kako je naglašeno u 2. poglavlju najveća horizontalna sila i prekretni moment mogu se pojaviti pri različitim faznim kutovima vala, no u ovoj analizi to nije bio slučaj te su se kombinacije opterećenja mogle provoditi samo za jednu vrijednost faznog pomaka. Sila od valova na strukturu je izračunata Morisonovom jednađbom (42). Po preporuci literature [1] u obzir je uzet i valni kinematički faktor vrijednosti 0.90 koji u obzir uzima valno širenje pri napredovanju, odnosno približava fizikalni model stvarnosti.

#### 5.4. Opterećenje morske struje

Kinematika vala, odnosno brzina valne čestice superponira se s brzinom čestice morske struje. U nedostatku preciznijih oceanografskih podataka o profilu brzine morske struje za lokaciju analizirane platforme korištena je preporuka API RP 2A-WSD koji nalaže da se za brzinu morske struje na razini mirne vodene površine uzme vrijednost 2-3 posto vrijednosti stalne brzine vjetera. Iz toga za operativne uvjete platforme povratnog perioda od 1 godine brzina morske struje proizlazi  $v_{mo} = 0.74 \text{ [m/s]}$ , dok za slučaj olujnog vremena povratnog perioda od 100 godina iznosi  $v_{ms} = 1.04 \text{ [m/s]}$ . Profil brzine morske struje je pretpostavljen kao linearna funkcija koja zamire sa dubinom mora, da bi na dnu brzina iznosila  $0 \text{ m/s}$ . Pretpostavka je da prilikom nailaska valova iz jednog smjera, u istom smjeru djeluje i sila vjetera i morske struje.

#### 5.5. Opterećenja zbog obraštanja i hidrodinamički koeficijenti

Wajac sva hidrodinamička opterećenja računa prema Morisonovoj jednadžbi (42), iz čijeg izraza se primjećuje da inercijska sila ovisi o kvadratu promjeru  $D$ , zbog toga je vrlo važno uzeti u obzir svako dodatno povećanje poprečnog presjeka promjera  $D$  uslijed obraštanja.

Debljina obraštanja se definira u ovisnosti o dubini:

**Tablica 11. Debljina obraštanja**

Raspon dubine (m)	Debljina obraštanja $t_g$ , (m)
$0 < d < 45.64$	0.12
$45.64 < d < 65.64$	0.05

Također Wajac u obzir uzima i opterećenje od dodatne težine zbog obraštanja, koje se računa od dna do razine mirne površine vode prema sljedećem izrazu:

$$\mathbf{F}_g = -(-\rho_g - \rho)g\pi(Dt_g - t_g^2)\mathbf{k}$$

Gdje je:

$\rho$  –gustoća mora,  $[t/m^3]$

$\rho = 1.025 \text{ [t/m}^3\text{]} ,$

$\rho_g$  –gustoća morskog obraštanja,  $[t/m^3]$

$\rho_g = 1.400 \text{ [t/m}^3\text{]} .$

$t_g$  –debljina sloja obraštanja,  $[m]$

$D$  –ekvivalentni promjer uključujući i debljinu obraštanja, (m)

$\mathbf{k}$  –jedinичni vektor u smjeru globalne koordinatne osi  $Z$

Hidrodinamički koeficijenti su određeni prema preporuci literature [1]:

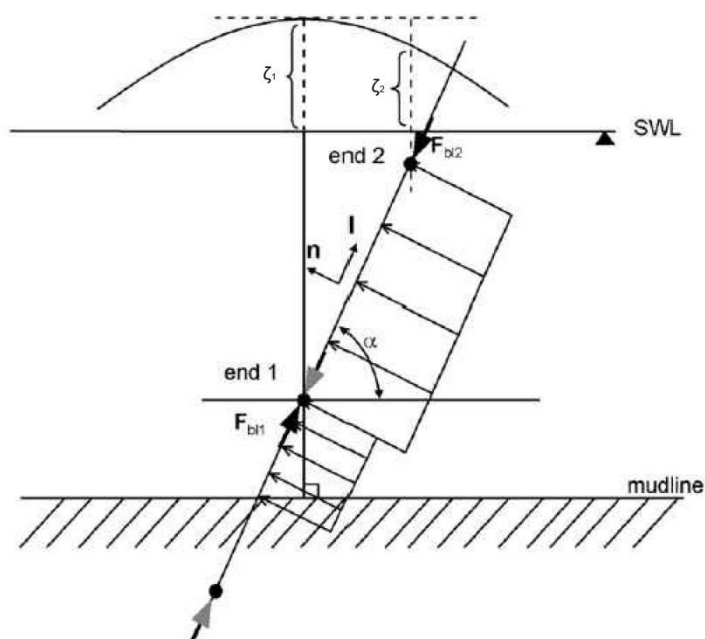
$$C_D = 1.05,$$

$$C_M = 1.20,$$

Zbog anoda koje se postavljaju na elemente strukture koeficijent otpora  $C_D$  treba povećati za 5%.

### 5.6. Sila uzgona

Sila uzgona u Wajacu računa se posebno u poprečnom smjeru na uzdužnu os elementa kao raspodijeljena sila po duljini elementa i u uzdužnom smjeru pri čemu su hvatišta sila dva krajnja čvora elementa i koncentrirane sile su usmjerene prema elementnu, Slika 24.



Slika 24. Računanje sile uzgona [6]

$$F_{bn} = \rho g A l \cos(\alpha) \mathbf{n}$$

$$F_{bl1} = \rho g A (-Z_1 + \zeta) \mathbf{l}$$

$$F_{bl2} = -\rho g A (-Z_1 + \zeta) \mathbf{l}$$

$$F_{bl} = \rho g A (-Z_1 + Z_2) \mathbf{l} = \rho g A l \sin(\alpha) \mathbf{l}$$



Gdje je:

$A$  – površina poprečnog presjeka elementa,  $[m^2]$

$l$  – duljina elementa,  $[m]$

$\alpha$  – nagib elementa, prikazan na Slika 24

$\zeta$  – elevacija valne površine,  $[m]$

$\mathbf{l}$  – jedinični vektor u uzdužnom smjeru elementa

$\mathbf{n}$  – jedinični vektor u smjeru normalnom na uzdužnu os elementa

Kako je vidljivo i na Slika 24 u slučaju kada poviše ne vertikalnog elementa imamo različitu elevaciju morske površine iznad dva čvora elementa zbog prolaska vala, Wajac uvijek uzima veću od dvije vrijednosti valne elevacije.

$$\zeta = \max(\zeta_1, \zeta_2)$$

Sila uzgona na strukturu platforme izračunata programom SESTR: 1142 kN

Valja napomenuti da je vrijednost sile uzgona promjenjiva, jer ovisi o elevaciji vala u svakom trenutku, pa je uzeta prosječna vrijednost.

### 5.7. Kombinacije opterećenja

Prema literaturi [1], za rešetkaste nepomične naftne platforme sa 3 noge (engl. leg) potrebno je analizirati strukturu za 12 smjerova nailaska valova. Sile uslijed vjetra također prate smjer nailaska valova, te tako i ona sačinjavaju još 12 dodatnih slučajeva opterećenja (engl. loadcase) strukture. Dodavanjem opterećenja zbog težine nadgrađa i opreme, te vlastite težine čelika same strukture platforme odnosno konduktorskih cijevi dolazimo do broja od 26 slučajeva opterećenja za superelement rešetkaste strukture platforme i 13 slučajeva opterećenja za superelement konduktorskih cijevi jer se utjecaj sile vjetra na ovaj superelement zanemario. Korištenjem programa PRESEL kojim smo dva superelementa niže razine spojili u superelement 10 (kompletni model strukture platforme i konduktorskih cijevi) također se vrši i spajanje raznih slučajeva opterećenja u jedan kojim će se vršiti daljna analiza. Opterećenja valova i vjetra djeluju zajedno iz istog smjera, pa je za svaki smjer nailaska definirana nova kombinacija opterećenja. Zbog generiranja najvećih mogućih naprezanja na strukturu svakoj kombinaciji opterećenja vjetra i valova dodana su i opterećenja od težina. Programom SESTR izračunate su komponente ukupnih sila i momenata za globalne koordinatne osi X,Y,Z za svako od 12 kombinacija opterećenja. Naravno sve navedeno je potrebno napraviti i za operativne vremenske uvjete i ekstremne vremenske uvjete.

### 5.7.1. Ekstremni vremenski uvjeti

Momenti su izračunati u odnosu na točku koja se nalazi u težištu horizontalnog presjeka platforme na najnižoj elevaciji, globalnih koordinata  $X=3.60$  m,  $Y=0.00$  m,  $Z=-73.90$  m.

**Tablica 12. Suma globalnih sila i momenata na strukturu za ekstremne vremenske uvjete**

<i>Kombinacija opterećenja</i>	<i>FX (kN)</i>	<i>FY (kN)</i>	<i>FZ (kN)</i>	<i>MX (kN)</i>	<i>MY (kN)</i>	<i>MZ (kN)</i>
1.	2.407E+03	5.990E+00	-1.739E+04	-6.283E+01	2.922E+04	1.449E+01
2.	2.694E+03	1.578E+03	-1.729E+04	2.754E+04	1.829E+04	6.095E+03
3.	1.501E+03	2.710E+03	-1.729E+04	4.665E+04	4.024E+04	9.899E+03
4.	-6.777E+00	2.835E+03	-1.738E+04	4.447E+04	6.647E+04	1.006E+04
5.	-1.199E+03	2.148E+03	-1.737E+04	3.237E+04	8.418E+04	7.745E+03
6.	-1.972E+03	1.155E+03	-1.736E+04	1.738E+04	9.566E+04	4.350E+03
7.	-2.242E+03	1.200E+00	-1.735E+04	1.237E+02	1.002E+04	2.831E+01
8.	-1.759E+03	-1.028E+03	-1.743E+04	-1.421E+04	9.087E+04	-3.921E+03
9.	-1.072E+03	-1.945E+03	-1.741E+04	-2.711E+04	8.162E+04	-7.009E+03
10.	1.769E+00	-2.526E+03	-1.737E+04	-3.733E+04	6.662E+04	-8.959E+03
11.	1.179E+03	-2.122E+03	-1.738E+04	-3.181E+04	4.895E+04	-7.769E+03
12.	1.984E+03	-1.152E+03	-1.739E+04	-1.716E+04	3.679E+04	-4.481E+03

### 5.7.2. Operativni vremenski uvjeti

**Tablica 13. Suma globalnih sila i momenata na strukturu za operativne vremenske uvjete**

<i>Kombinacija opterećenja</i>	<i>FX (kN)</i>	<i>FY (kN)</i>	<i>FZ (kN)</i>	<i>MX (kN)</i>	<i>MY (kN)</i>	<i>MZ (kN)</i>
1.	1.021E+03	5.400E+00	-1.750E+04	-8.872E+00	5.283E+04	3.973E+01
2.	1.106E+03	6.506E+02	-1.749E+04	9.774E+03	4.975E+04	2.614E+03
3.	5.992E+02	1.069E+03	-1.750E+04	1.540E+04	5.820E+04	4.012E+03
4.	-4.012E+00	1.061E+03	-1.751E+04	1.379E+04	6.693E+04	3.797E+03
5.	-5.001E+02	8.763E+02	-1.750E+04	1.153E+04	7.326E+04	3.210E+03
6.	-7.905E+02	4.580E+02	-1.749E+04	5.831E+03	7.669E+04	1.809E+03
7.	-8.348E+02	-1.194E+00	-1.751E+04	2.897E+01	7.656E+04	2.349E+01
8.	-6.956E+02	-4.098E+02	-1.751E+04	-4.610E+03	7.475E+04	-1.580E+03
9.	-4.031E+02	-7.215E+02	-1.750E+04	-8.196E+03	7.150E+04	-2.633E+03
10.	1.538E+00	-8.408E+02	-1.750E+04	-9.445E+03	6.696E+04	-2.983E+03
11.	3.541E+02	-6.212E+02	-1.752E+04	-6.271E+03	6.343E+04	-2.286E+03
12.	7.501E+02	-4.342E+02	-1.750E+04	-5.238E+03	5.777E+04	-1.718E+03

## 6. ODZIV STRUKTURE MODELA

### 6.1. Kriteriji dopuštenih naprezanja osnovnih opterećenja

Kriteriji po kojima će se provjeriti dopuštena naprezanja cilindričnih elemenata strukture propisana su pravilima API: „Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platform – Working Stress Design“, [1].

#### 6.1.1. Aksijalno vlačno naprezanje

$$F_t = 0.6 F_y \quad (62)$$

Gdje je:

$F_y$  – čvrstoća materijala na granici tečenja.

#### 6.1.2. Aksijalno tlačno naprezanje

Izraz po kojem se određuje dopušteno aksijalno tlačno naprezanje,  $F_a$ , ovisi o omjeru promjera i debljine stijenke elementa  $D/t$ :

Za  $D/t_s \leq 60$ :

Ako vrijedi  $Kl/r < C_c$ :

$$F_a = \frac{\left[1 - \frac{(Kl/r)^2}{2C_c^2}\right] F_y}{\frac{5}{3} + \frac{3(Kl/r)}{8C_c} - \frac{(Kl/r)^3}{8C_c^3}} \quad (63)$$

Za  $Kl/r > C_c$ :

$$F_a = \frac{12 \pi^2 E}{23(Kl/r^2)} \quad (64)$$

Gdje je:

$$C_c = \sqrt{\frac{2\pi^2 E}{F_y}},$$

$E$  – Youngov modul elastičnosti,  $[kN/m^2]$

$K$  –faktor efektivne duljine,  $[m]$ , iz tablice 3.3.1d iz [1],

$r$  – polumjer cijevi,  $[m]$ ,

Za  $D/t_s > 60$  potrebno je zamijeniti kritično lokalno izvijanje (manjeg od  $F_{xe}$  ili  $F_{xc}$ ) za  $F_y$  pri određivanju  $C_c$  i  $F_a$ . U slučaju kada je  $60 < D/t_s < 300$ , s debljinom stijenke  $t_s \geq$

6 [mm], treba odrediti i elastično lokalno izvijanje  $F_{xe}$  i neelastično lokalno izvijanje  $F_{xc}$  uzrokovano aksijalnim sabijanjem:

$$F_{xe} = 2CE t_s/D \quad (65)$$

Gdje je:

$C$  – koeficijent izvijanja

Teoretska vrijednost iznosi  $C = 0.6$ , ali preporuča se korištenje smanjene vrijednosti  $C = 0.3$  koje u obzir uzima i geometrijske ne savršenosti.

$$F_{xc} = F_y \cdot [1.64 - 0.23(D/t_s)^{1/4}] \leq F_{xe} \quad (66)$$

Ako je  $D/t_s \leq 60$ :

$$F_{xc} = F_y \quad (67)$$

$F_y$  – čvrstoća materijala na granici tečenja.

### 6.1.3. Naprezanje uslijed savijanja

Ako je  $D/t_s \leq 10340/F_y$ :

$$F_b = 0.75 F_y \quad (68)$$

Ako je  $10340/F_y < \frac{D}{t_s} < 20680/F_y$ :

$$F_b = \left[ 0.84 - 1.74 \frac{F_y D}{E t_s} \right] F_y \quad (69)$$

Ako je  $20680/F_y < \frac{D}{t_s} < 300$ ,

$$F_b = \left[ 0.72 - 0.58 \frac{F_y D}{E t_s} \right] F_y \quad (70)$$

### 6.1.4. Smična naprezanja

Najveće smično naprezanje cilindričnog elementa:

$$f_v = \frac{F_v}{0.5 A} \quad (71)$$

Gdje je:

$f_v$  – najveće smično naprezanje, [kN/m<sup>2</sup>],

$F_v$  – smična sila, [kN],

$A$  – poprečni presjek,  $[m^2]$ .

Dopušteno smično naprezanje:

$$f_{vd} = 0.4 F_y \quad (72)$$

Gdje je:

$f_{vd}$  – dopušteno smično naprezanje,  $[kN/m^2]$ ,

### 6.1.5. Torzijska naprezanja

Najveća torzijska naprezanja cilindričnog elementa:

$$f_t = \frac{M_t(D/2)}{I_p} \quad (73)$$

Gdje je:

$f_{vt}$  – najveće torzijsko naprezanje,  $[kN/m^2]$ ,

$M_t$  – moment torzije,  $[kNm]$ ,

$I_p$  – polarni moment tromosti,  $[m^4]$ .

Dopušteno naprezanje se određuje:

$$f_{td} = 0.4 F_y \quad (74)$$

$F_y$  – čvrstoća materijala na granici tečenja.

## 6.2. Kriteriji dopuštenih naprezanja za kombinirana opterećenja

Kriteriji po kojima će se provjeriti dopuštena naprezanja cilindričnih elemenata strukture propisana su pravilima API: „Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platform – Working Stress Design“, [1].

Cilindrični elementi izloženi kombinaciji aksijalnog tlačnog i savojnog opterećenja moraju zadovoljiti zahtjeve na svim mjestima po svojoj duljini.

$$\frac{f_a}{F_a} + \frac{C_m \sqrt{f_{by}^2 + f_{bz}^2}}{\left(1 - \frac{f_a}{F_e}\right) F_b} \leq 1.0 \quad (75)$$

$$\frac{f_a}{0.6 F_y} + \frac{\sqrt{f_{by}^2 + f_{bz}^2}}{F_b} \leq 1.0 \quad (76)$$

U slučaju kada je  $f_a/F_a \leq 0.15$  sljedeća formula bi se trebala koristiti umjesto prethodne dvije:

$$\frac{f_a}{F_a} + \frac{\sqrt{f_{by}^2 + f_{bz}^2}}{F_b} \leq 1.0 \quad (77)$$

U slučaju da vrijednosti  $C_m$  i  $F_e$  ne odgovaraju i  $f_{bx}$  i  $f_{by}$ . Ako su različite vrijednosti primjenjive, donja jednadžba bi trebala biti korištena:

$$\frac{f_a}{F_a} + \frac{\sqrt{\left[ \frac{C_{my} \cdot f_{by}}{1 - \frac{f_a}{F_e}} \right]^2 + \left[ \frac{C_{mz} \cdot f_{bz}}{1 - \frac{f_a}{F_e}} \right]^2}}{F_b} \leq 1.0 \quad (78)$$

Gdje je:

$f_a$  – aksijalno tlačno ili vlačno naprezanje

$f_{by}$  – tlačno ili vlačno naprezanje uslijed savijanja

$F_a$  – dopušteno aksijalno tlačno naprezanje

$F_b$  – dopušteno naprezanje uslijed savijanja

$F_y$  – čvrstoća materijala na granici tečenja.

Faktor  $C_m$  je:

- 0.85,
- $0.6 - 0.4(M_1/M_2)$ , ali ne manje od 0.4 i ne veće od 0.85,
- $1 - 0.4(f_a/F_e)$  ili 0.85, ovisi što je manje.

### 6.3. Prikaz rezultata dobivenih iz FRAMEWORK-a i XTRACT-a

XTRACT je SESAM-ov modul koji omogućava prikaz rezultata analize, kao izlaznog podatka iz SESTRA-e. Prikazuje sve komponente tenzora naprezanja za elemente strukture, te pomake čvorova strukture ovisno o odabranoj kombinaciji opterećenja. FRAMEWORK je modul koji omogućava i dodatne analize osim prikazivanja izračunatih naprezanja, za razliku od XTRACT-a, te i dodatno modeliranje određenih dijelova strukture koji ranije nisu dovoljno detaljno određeni, kao što su na primjer spojevi elemenata, suženja određenog elementa, razmak između elemenata pri ulazu u međusobni spoj. FRAMEWORK je opremljen i proširenjima koja sadrže razne iskustvene kodove eminentnih pravila kojima se

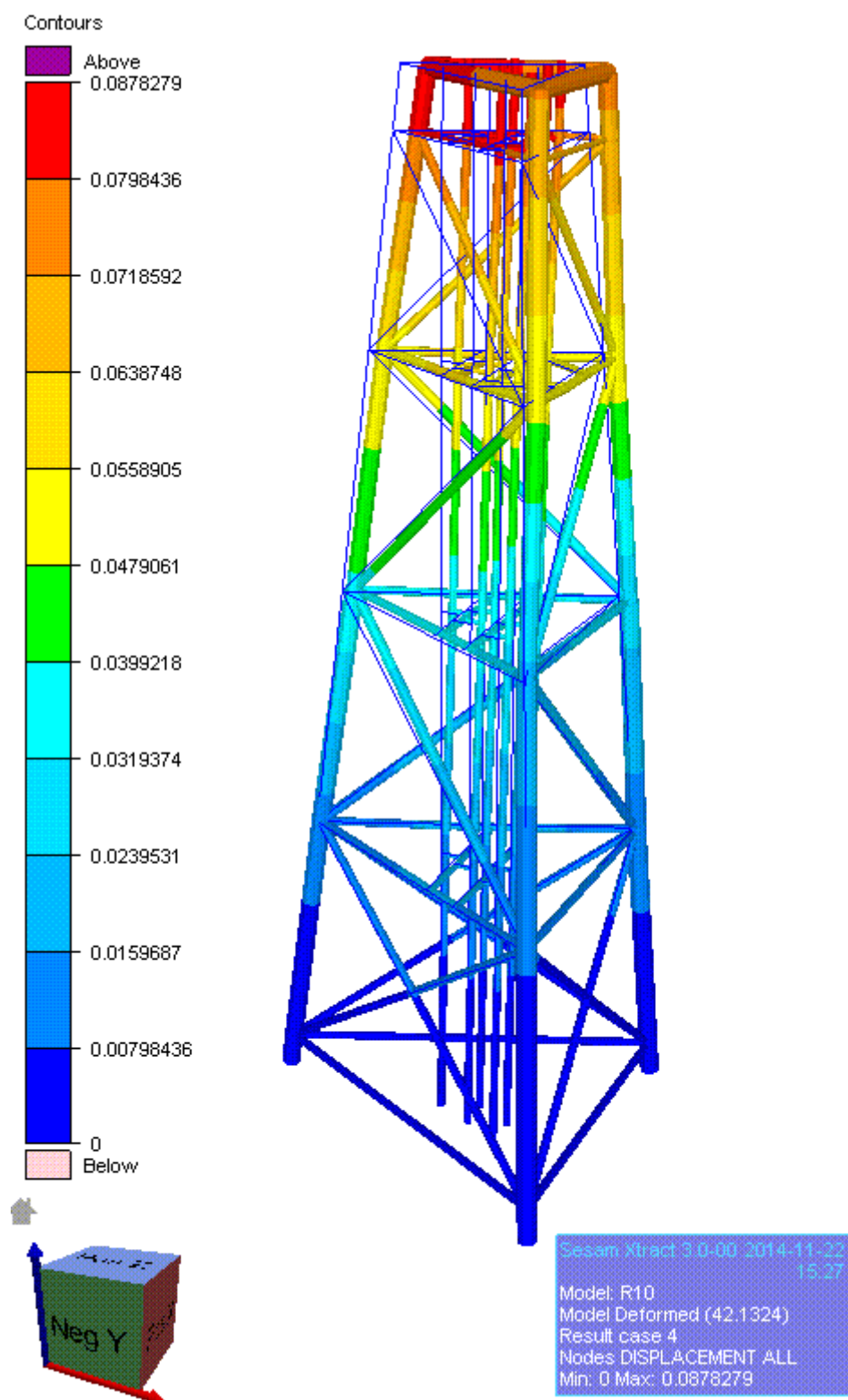
provjeravaju mogućnosti nastajanja glavnih tipova oštećenja, proširenje koje omogućava analizu potresnog opterećenja, kao i dinamičku analizu na zamor materijala. Rezultati odabrane analize su prikazani na modelu te ih je jednostavno koristiti kao slike.

Statička analiza strukture rešetkaste naftne platforme uključuje provjeru strukture na izvijanje (engl. stability check) i provjeru naprezanja koja se javljaju u elementima strukture u odnosu na granicu tečenja materijala. Za dobivanje željenih rezultata analize koristit će se dodatak u FRAMEWORK-u naziva API koji sadržava kod definiran API-AISC-WSD [1], po čijim kriterijima će se provjeriti struktura za željene tipove oštećenja naredbama YIELD CHECK i STABILITY CHECK. Provjera razine naprezanja u odnosu na granicu tečenja materijala je provedena interakcijskom jednadžbom čiji rezultat je faktor iskoristivosti (engl. usage factor). Ako je faktor iskoristivosti elementa manji od 1.0, program zaključuje da je element siguran u suprotnom slučaju javlja da element ne zadovoljava uvjete definirane kodom pravila. Isto vrijedi i za provjeru stabilnosti strukture na izvijanje. Koja jednadžba iz poglavlja 6.2. će biti korištena ovisi o svojstima poprečnog presjeka elementa. Analiza je provedena sukladno okolišnim opterećenjima za operativno vremensko stanje i ekstremno vremensko stanje opterećenja. Za kod provjere po API-AISC-WSD, definirajući naredbom CONDITION STORM ili CONDITION OPERATING stanje vremenskih uvjeta, dopuštena se naprezanja automatski povećavaju:

- Operativne uvjete: 0%
- Ekstremne uvjete: 33%
- Potres: 70%

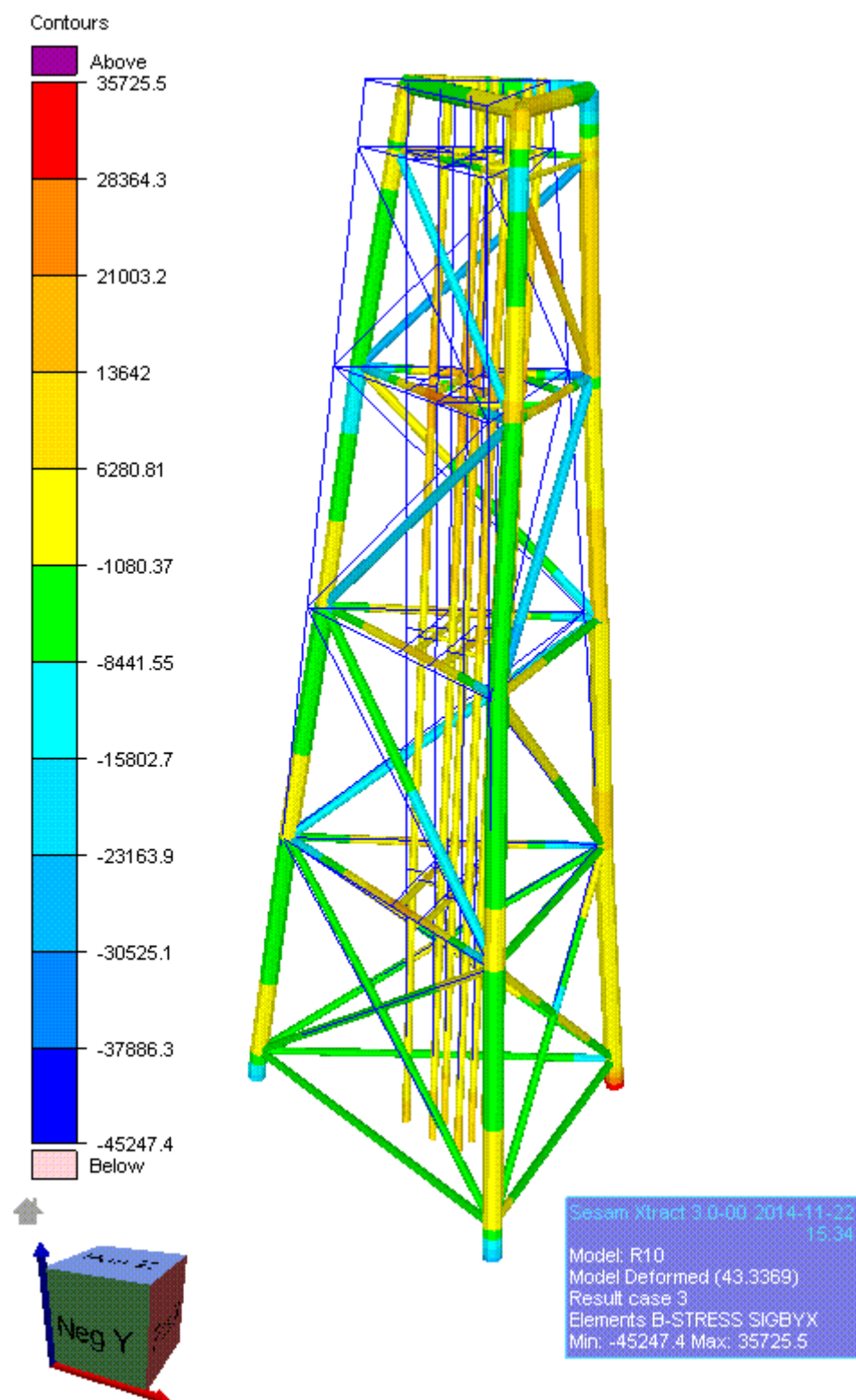
Provedena statička analiza je pokazala da struktura platforme zadovoljava uvjete definirane kodom provjere. Prikazani su samo rezultati za slučajeve opterećenja koji su najkritičnije opteretili strukturu i za slučaj operativnih i ekstremnih okolišnih uvjeta. Svi rezultati analize su dani u prilogu [II].

### 6.3.1. Ekstremni vremenski uvjeti

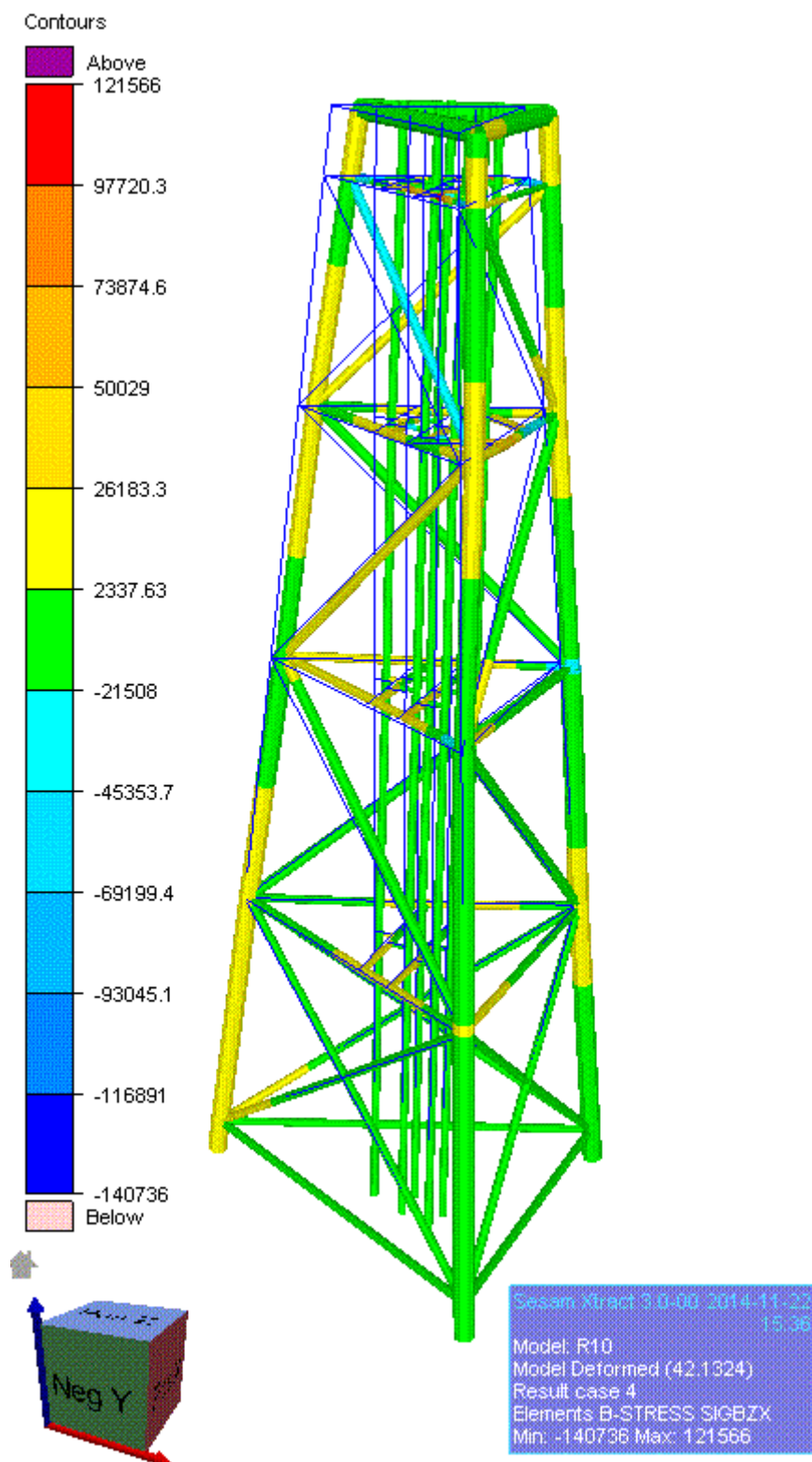


Slika 25. Pomaci čvorova [m] za slučaj opterećenja 4  
 ( $H = 10.08 \text{ m}$ ,  $T = 10.19 \text{ s}$ ,  $\beta = 90^\circ$ .)

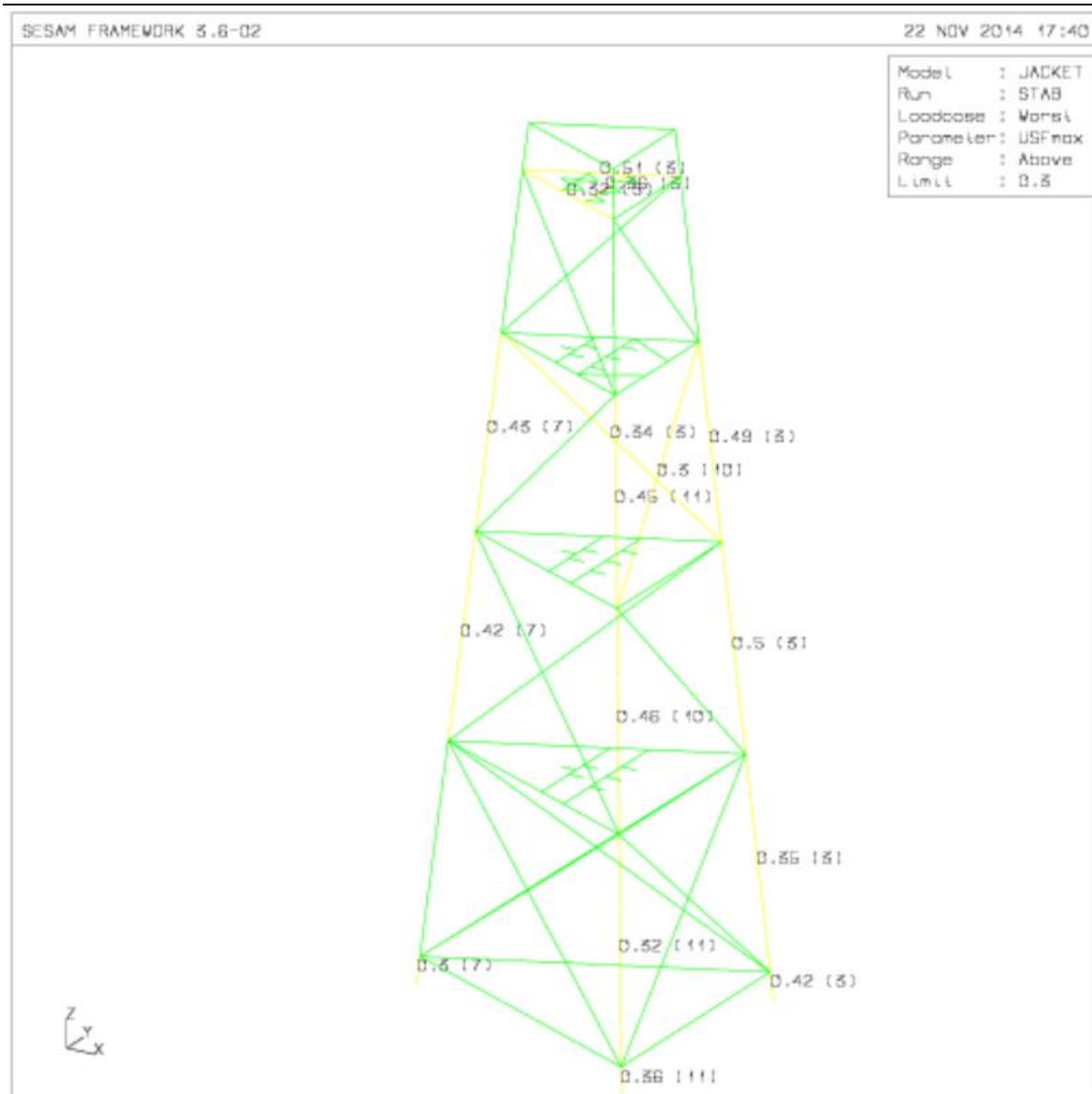




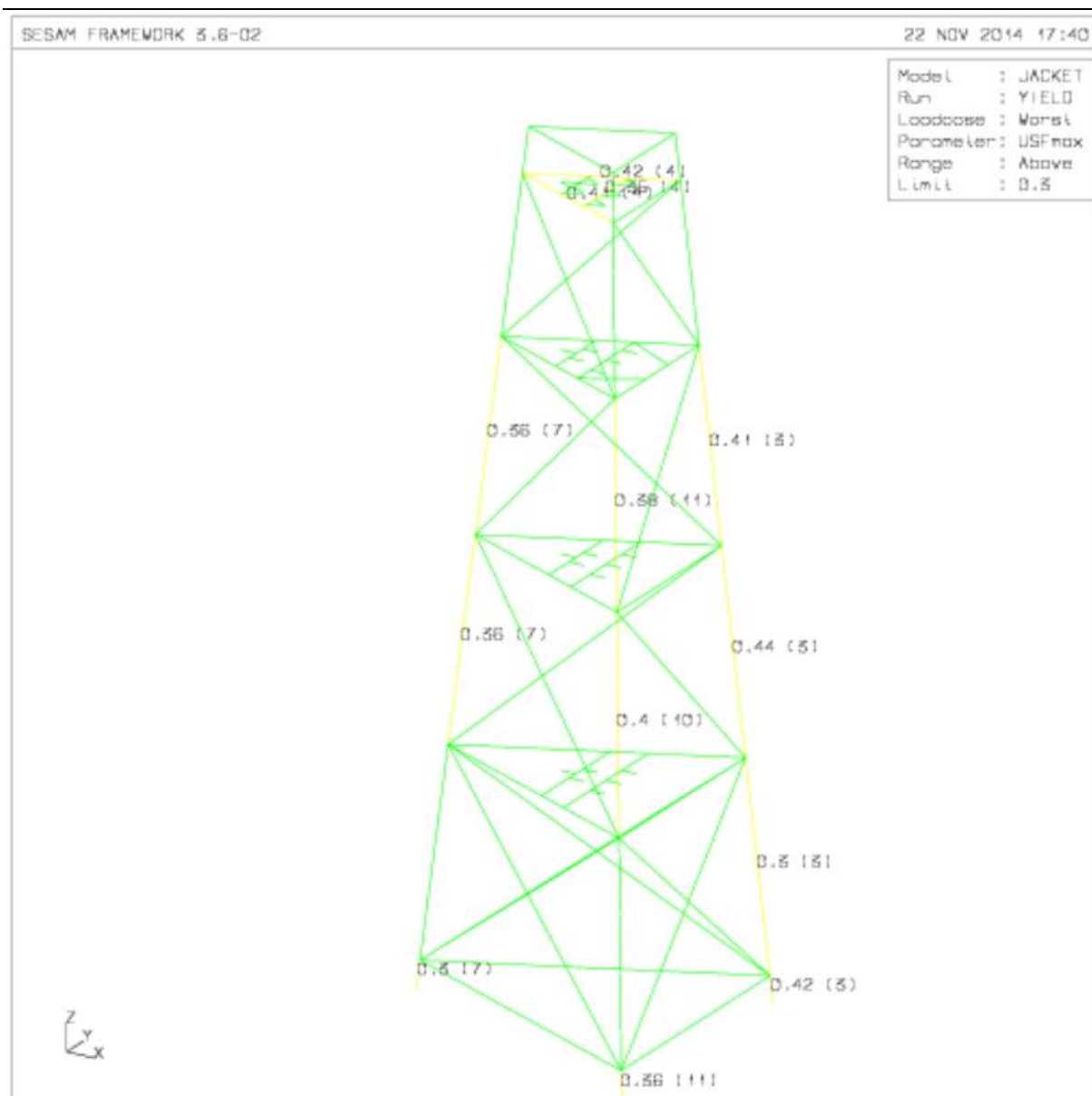
Slika 26. Naprezanje zbog savijanja  $\sigma_{yx}$  [ $kN/m^2$ ] slučaj opterećenja 3  
 ( $H = 12.21\text{ m}$ ,  $T = 11.22\text{ s}$ ,  $\beta = 60^\circ$ )



Slika 27. Naprezanje zbog savijanja  $\sigma_{zx}$  [ $kN/m^2$ ] slučaj opterećenja 4  
 ( $H = 10.08\text{ m}$ ,  $T = 10.19\text{ s}$ ,  $\beta = 90^\circ$ .)

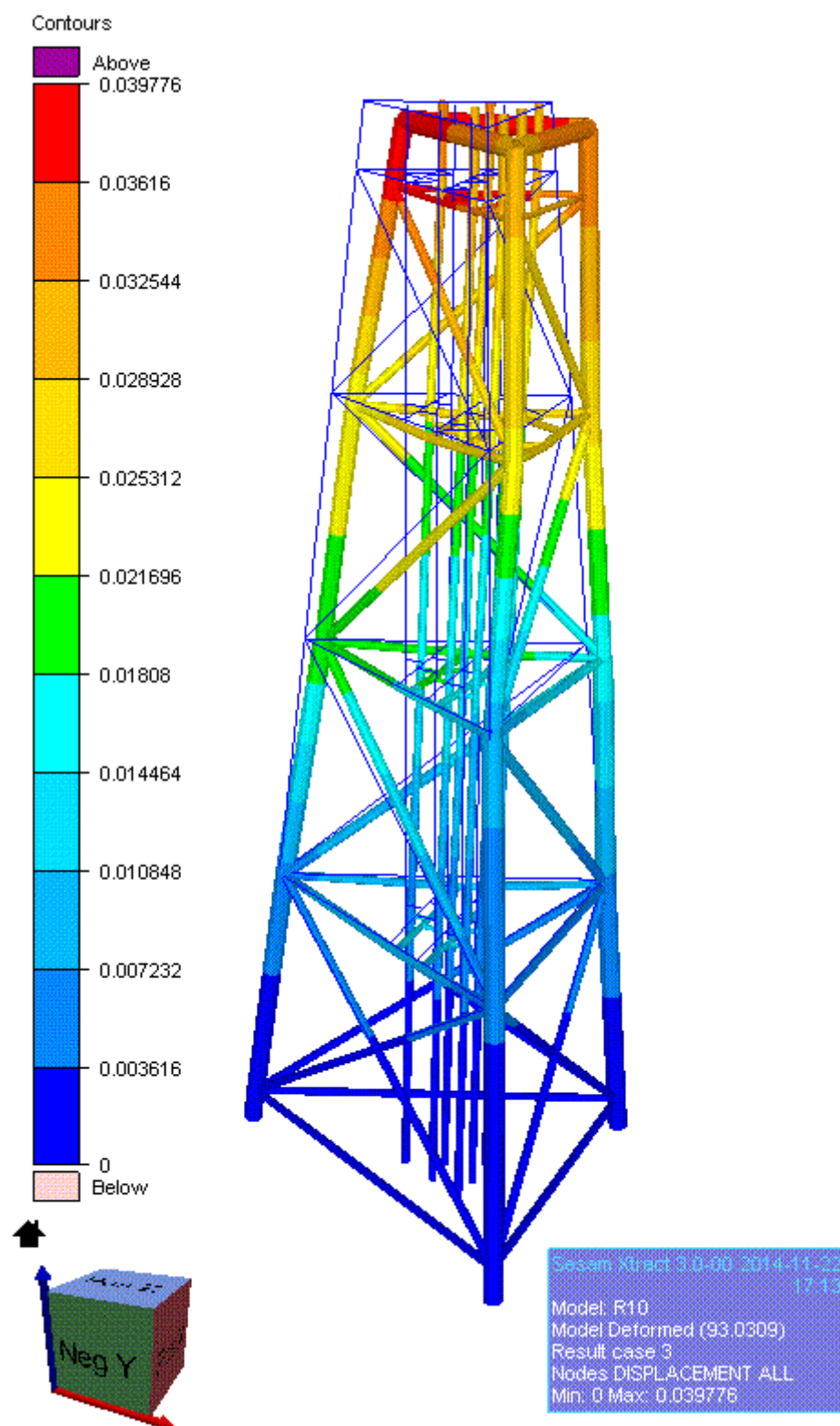


**Slika 28. Provjera strukture na izvijanje za slučaj opterećenja 3**  
**( $H = 12.21\text{ m}$ ,  $T = 11.22\text{ s}$ ,  $\beta = 60^\circ$ .)**

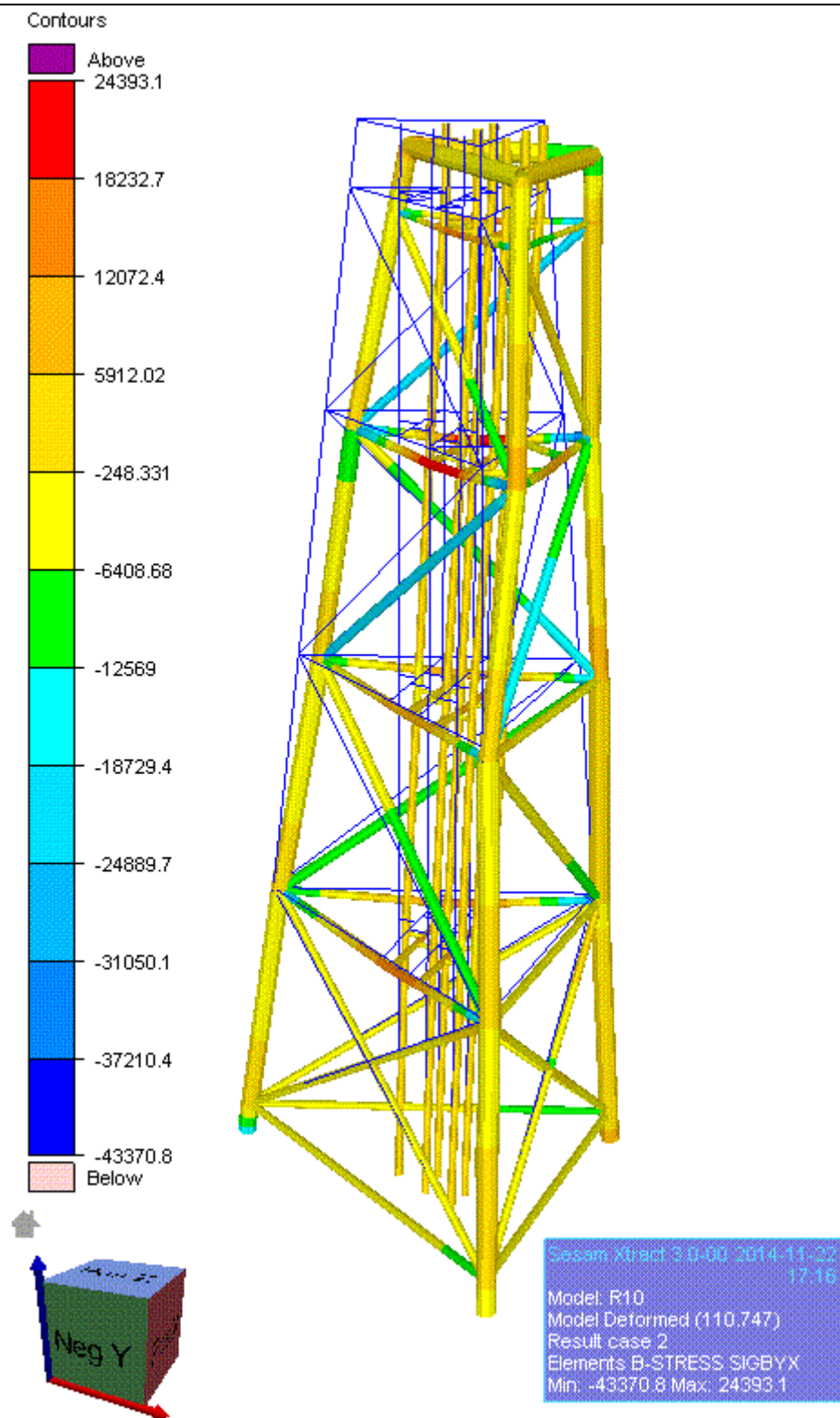


**Slika 29. Provjera strukture na tečenje za slučaj opterećenja 3**  
**( $H = 12.21\text{ m}$ ,  $T = 11.22\text{ s}$ ,  $\beta = 60^\circ$ )**

### 6.3.2. Operativni vremenski uvjeti

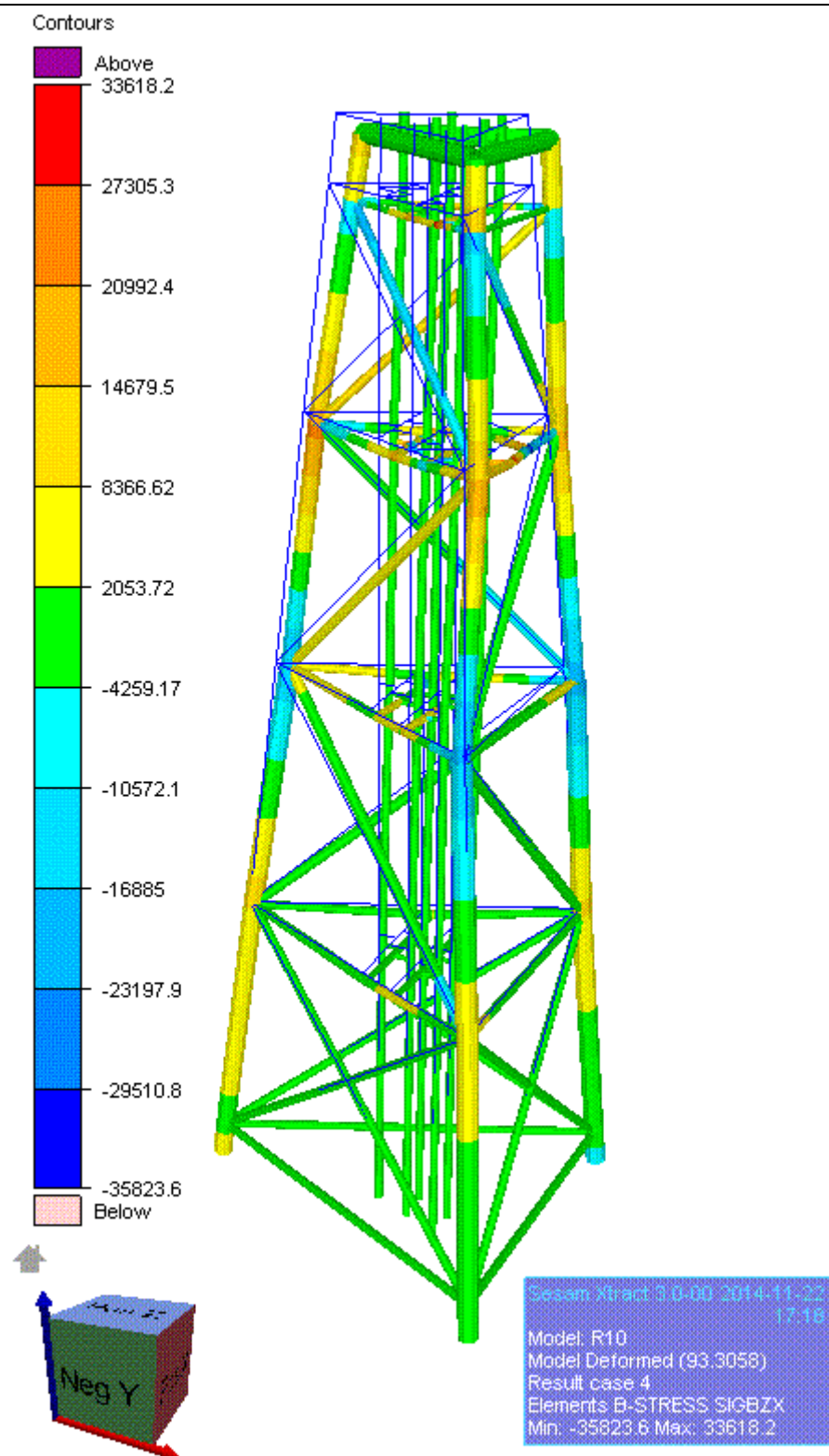


Slika 30. Pomaci čvorova [m] za slučaj opterećenja 3  
 ( $H = 8.61\text{ m}$ ,  $T = 7.20\text{ s}$ ,  $\beta = 60^\circ$ .)

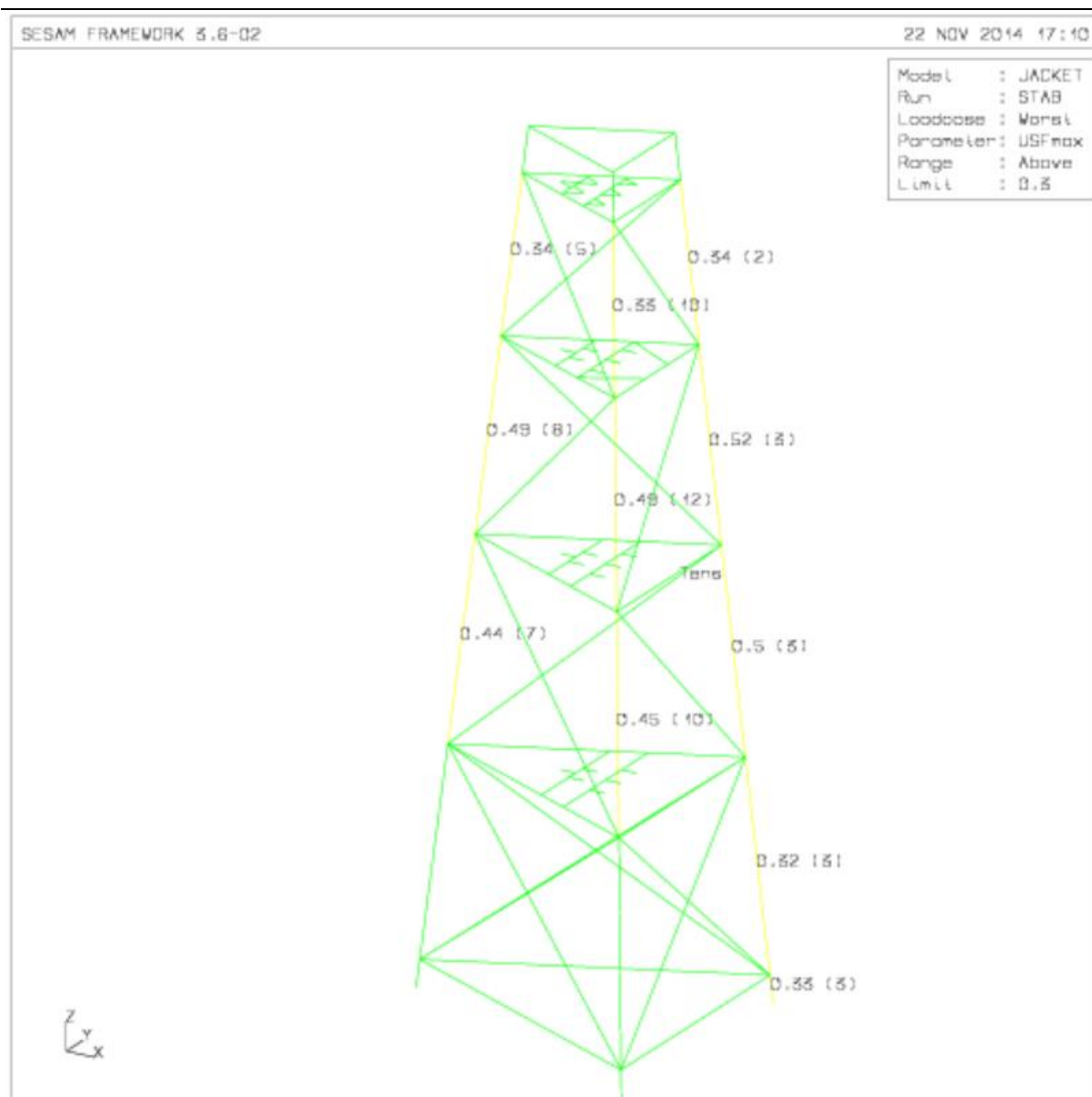


**Slika 31. Naprezanje zbog savijanja  $\sigma_{yx}$  [ $kN/m^2$ ] slučaj opterećenja 2**  
**( $H = 9.05\text{ m}$ ,  $T = 7.95\text{ s}$ ,  $\beta = 30^\circ$ .)**



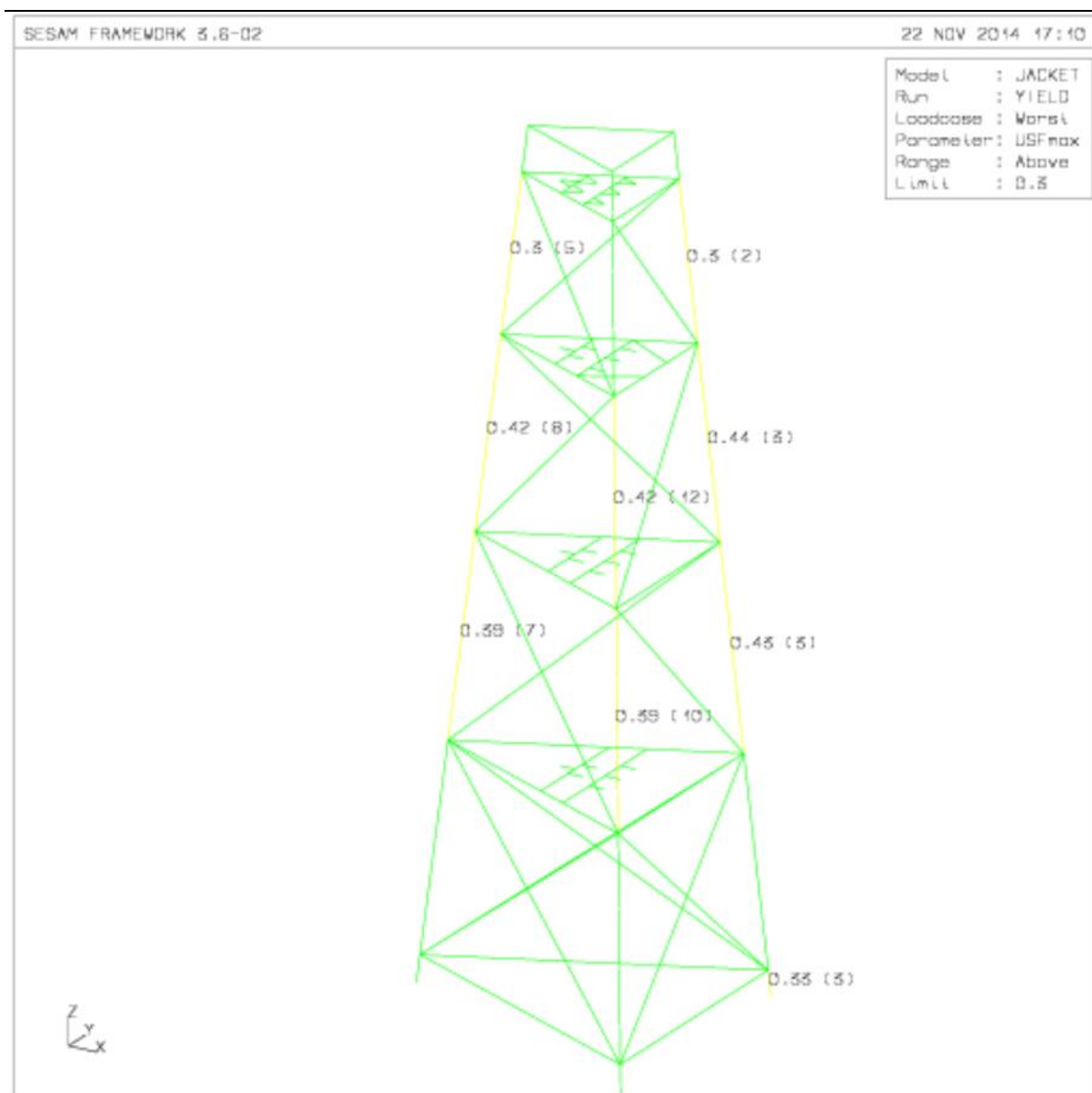


Slika 32. Naprezanje zbog savijanja  $\sigma_{zx}$  [ $kN/m^2$ ] slučaj opterećenja 4  
 ( $H = 7.90\text{ m}$ ,  $T = 6.06\text{ s}$ ,  $\beta = 90^\circ$ .)



**Slika 33. Provjera strukture na izvijanje za slučaj opterećenja 3**  
**( $H = 8.61\text{ m}$ ,  $T = 7.20\text{ s}$ ,  $\beta = 60^\circ$ .)**





**Slika 34. Provjera strukture na tečenje za slučaj opterećenja 3**  
**( $H = 8.61\text{ m}$ ,  $T = 7.20\text{ s}$ ,  $\beta = 60^\circ$ .)**

## 7. ZAKLJUČAK

U sklopu ovog diplomskog rada provedena je detaljna statička analiza strukture fiksne rešetkaste platforme. Iz rezultata odziva strukture jasno je vidljivo da platforma zadovoljava po svim kriterijima. Faktor iskoristivosti samo za par elemenata prelazi vrijednost 0.5 što je tek polovica dopuštene razine. Iz svega navedenog može se zaključiti da je u pogledu statičke analize, struktura predimenzionirana. Također jedno od objašnjenja zbog čega se struktura platforme doima predimenzioniranom je i činjenica da struktura platforme mora biti sposobna izdržati i opterećenja od potresa koja su višestruko snažnija i ne predvidljivija u usporedbi sa svim ostalim okolišnim opterećenjima. Bitno je naglasiti da ako je ovakva statička analiza primijenjena još u projektnoj fazi, iz dobivenih rezultata može se zaključiti kako treba idealno orijentirati strukturu s obzirom na smjer nailaska valova, a da pri tome opterećenja na samu strukturu budu minimizirana. Statička analiza je prvi korak analiziranja strukture ovakvog pučinskog objekta, koji je u pravilu cijeli svoj životni period izložen cikličkim opterećenjima od valova i udara vjetra, što također sugerira da je nakon provjere statičkih kriterija potrebno voditi računa i o zamoru materijala na ovakvim konstrukcijama. Još jedno ogromno područje je vezano uz problematiku određivanja rubnih uvjeta na dnu. U ovoj analizi zbog činjenice da je cjelokupni diplomski rad imao vremenski rok od dva mjeseca, a zbog pojednostavljenja, rubni uvjeti su modelirani kao uklještenja, što bi se moglo smatrati poprilično grubom pretpostavkom, te bi im se u daljnjoj analizi trebalo posvetiti više vremena.

Rad na ovom diplomskom radu dao mi je dobar uvid u složenost analiziranja i osnivanja pučinskog objekta, dodatno mi je približio problematiku koju je potrebno savladati da bi se provela jedna ovakva analiza, a time mi je dao poticaja da se i dalje nastavim baviti ovom problematikom.

## **LITERATURA**

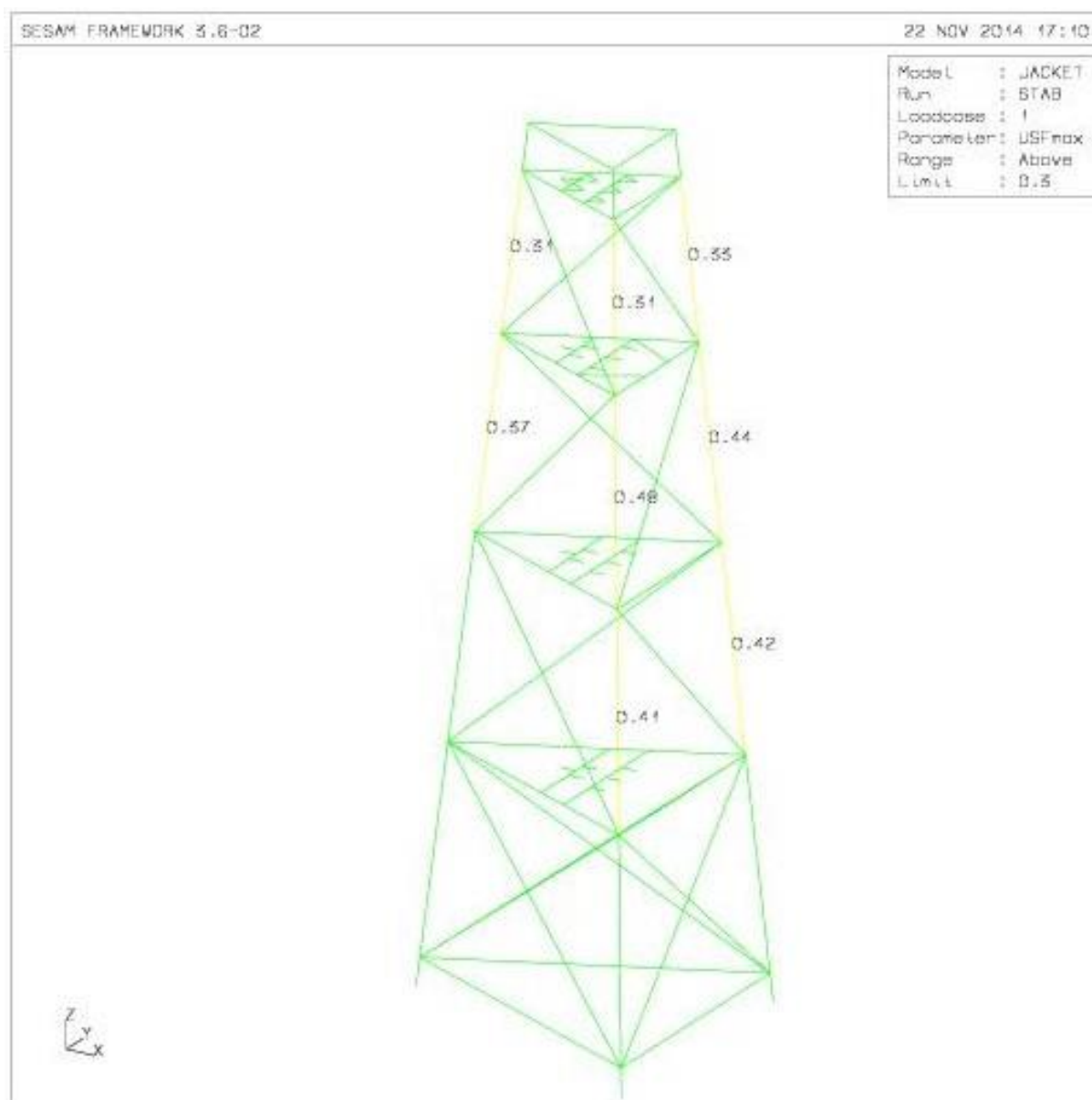
- [1] American Petroleum Institute: Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platform – Working Stress Design 21. Edition, 2002.
- [2] Čorić Većeslav, Prpić-Oršić Jasna.: Pomorstvenost plovni objekata, Rijeka, 2006.
- [3] Journee J.M.J., Massie W.W: Offshore Hydromechanics, 2001.
- [4] PREFEM User's Manual, Det Norske Veritas, Oslo 2004.
- [5] Jurica Sorić: Metoda konačnih elemenata, Zagreb, 2004.
- [6] WAJAC User's Manual, Det Norske Veritas, Oslo 2004
- [7] PRESEL User's Manual, Det Norske Veritas, Oslo 2004
- [8] SESTRA User's Manual, Det Norske Veritas, Oslo 2004
- [9] FRAMEWORK User's Manual, Det Norske Veritas, Oslo 2004

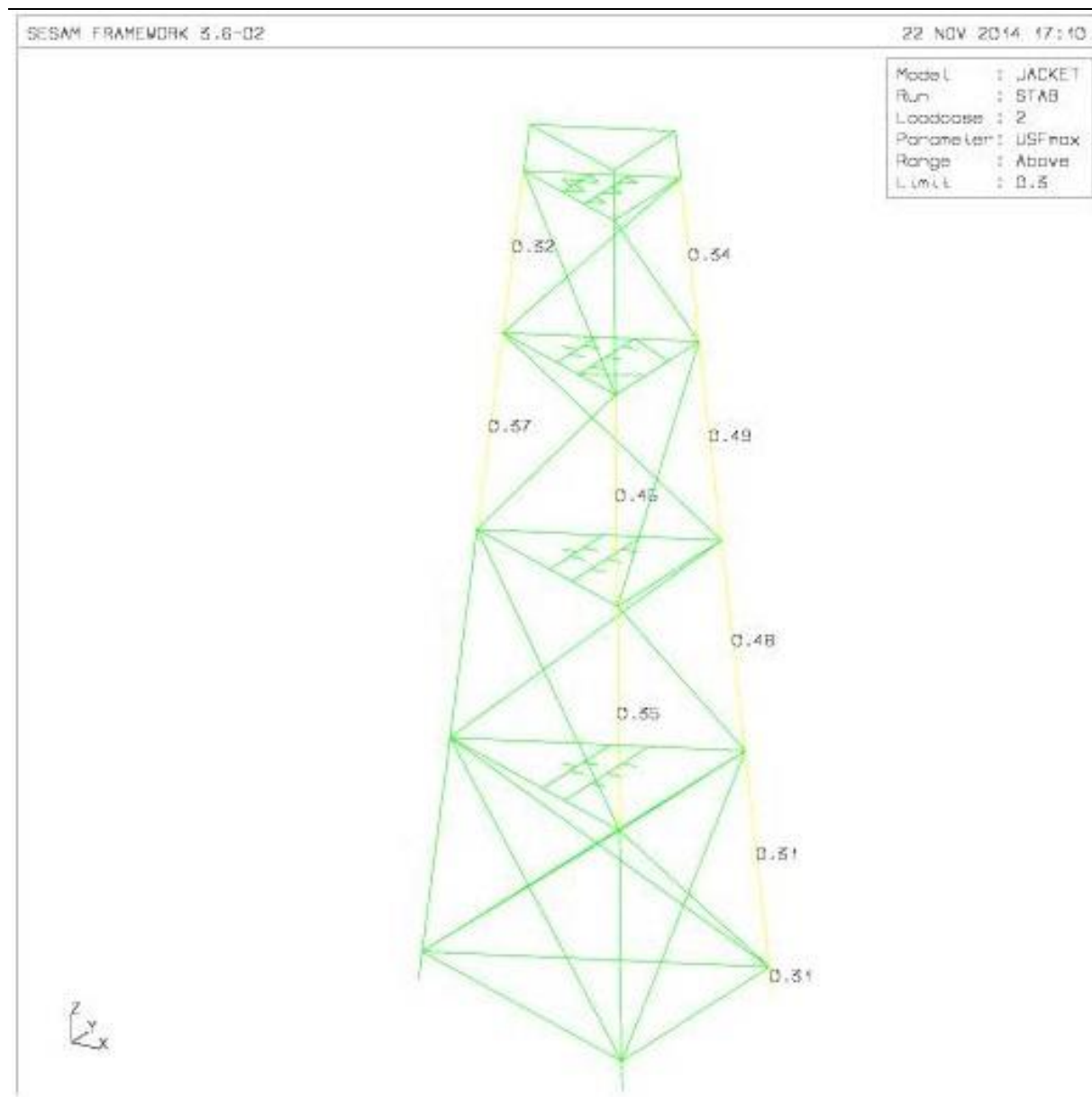
## **PRILOZI**

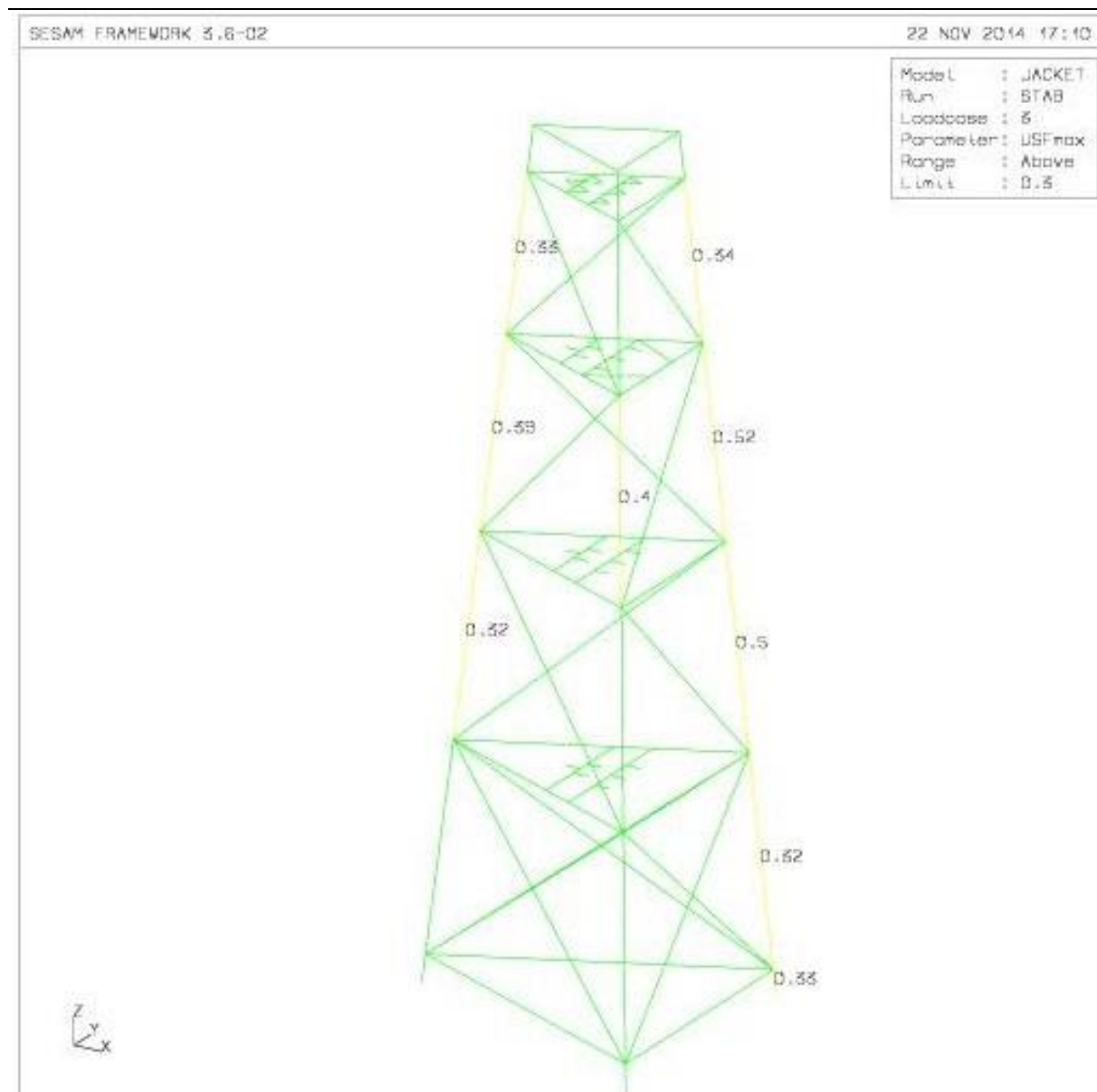
- I. CD-R disc
- II. Svi rezultati analize
- III. Tehnička dokumentacija

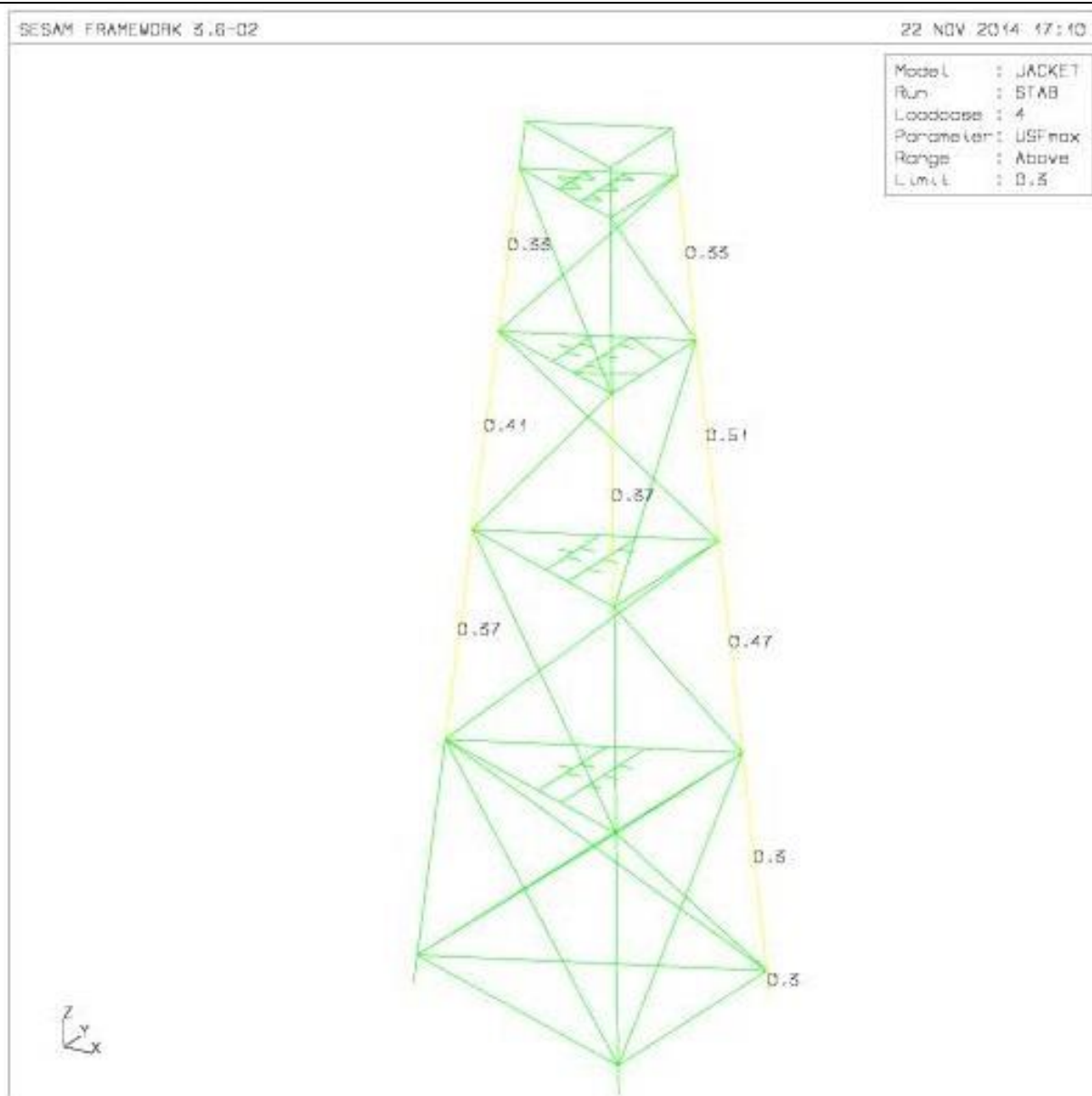
## PRILOG II

## Rezultati za operativne vremenske uvjete

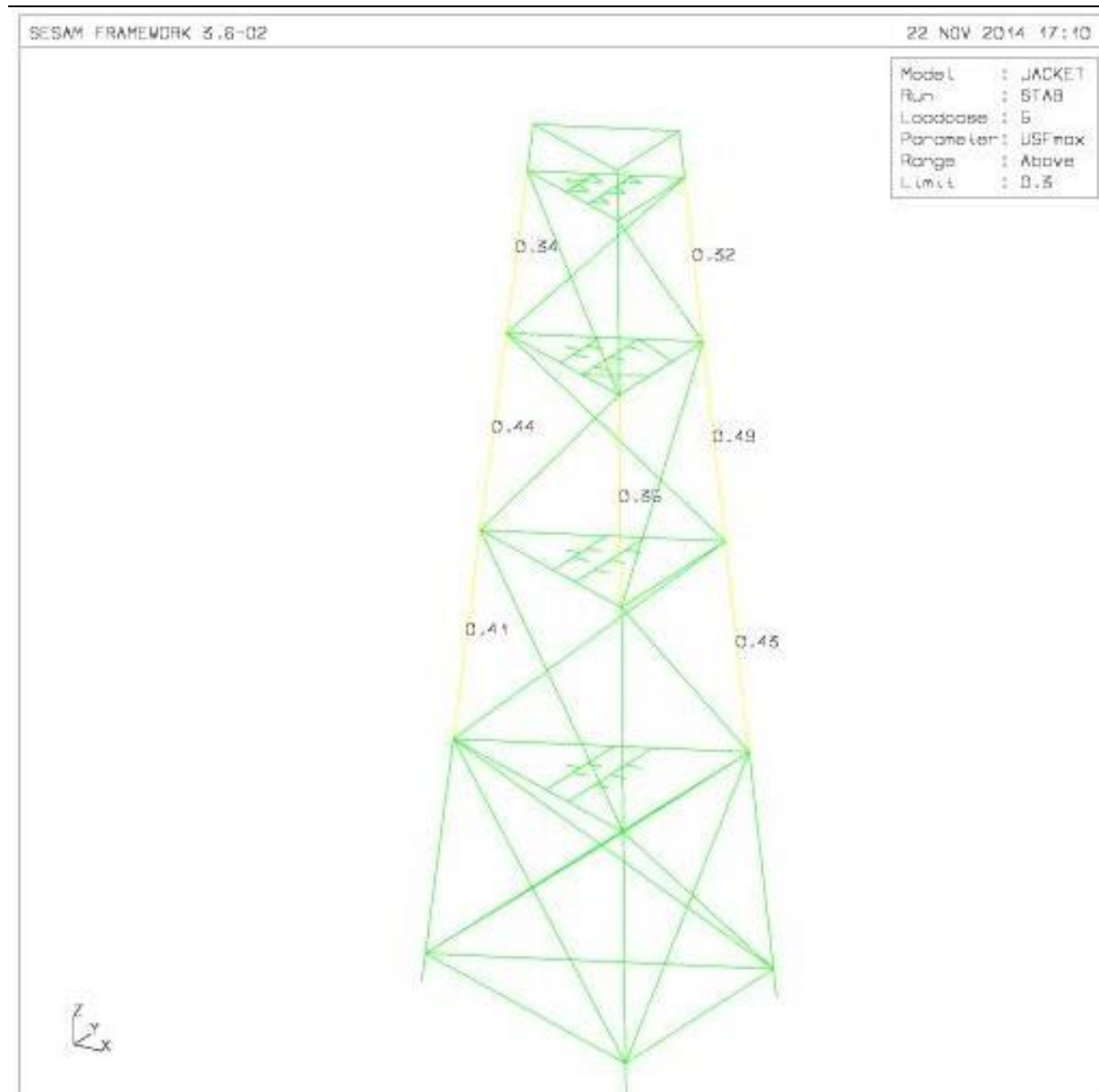


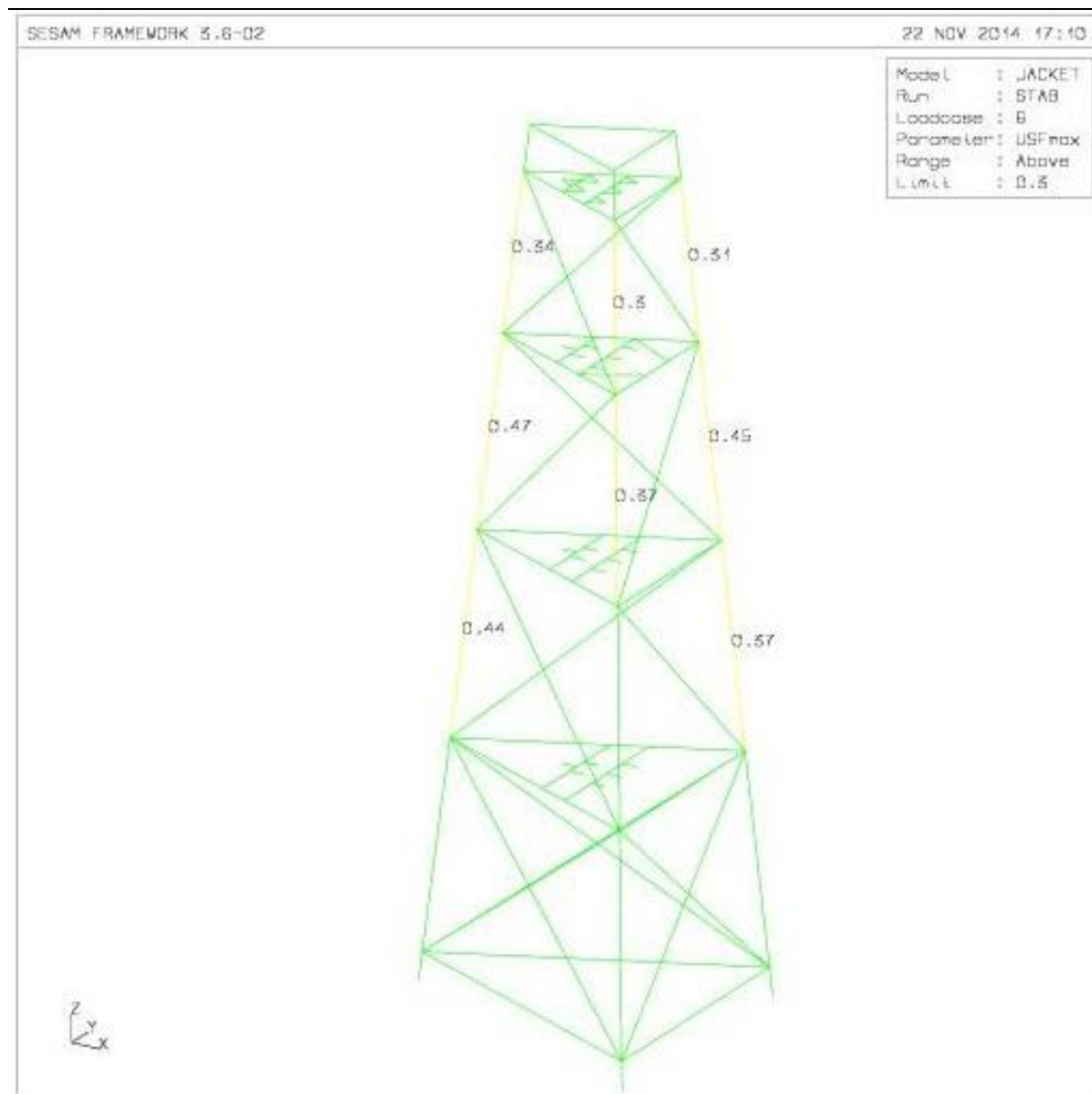


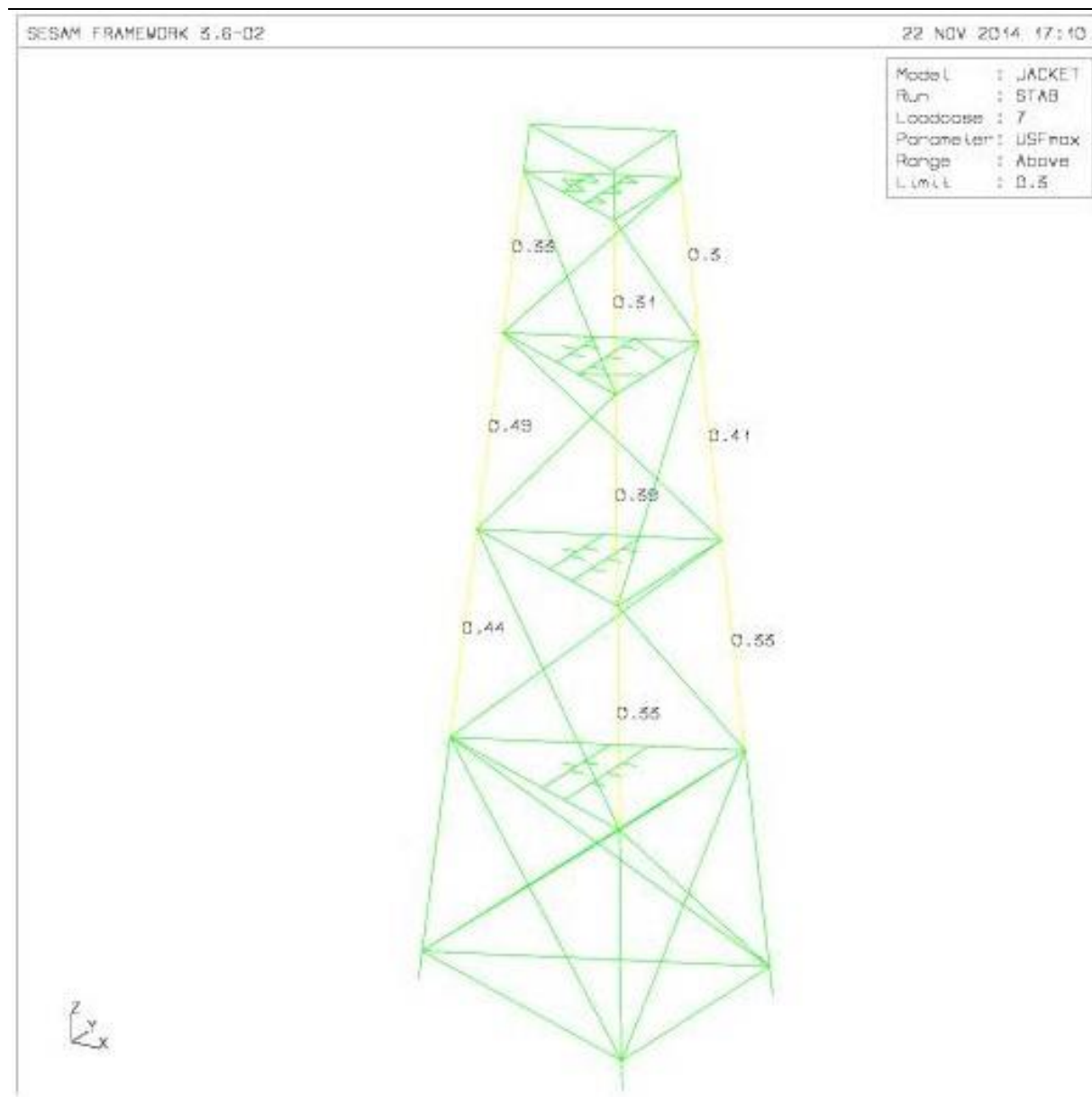


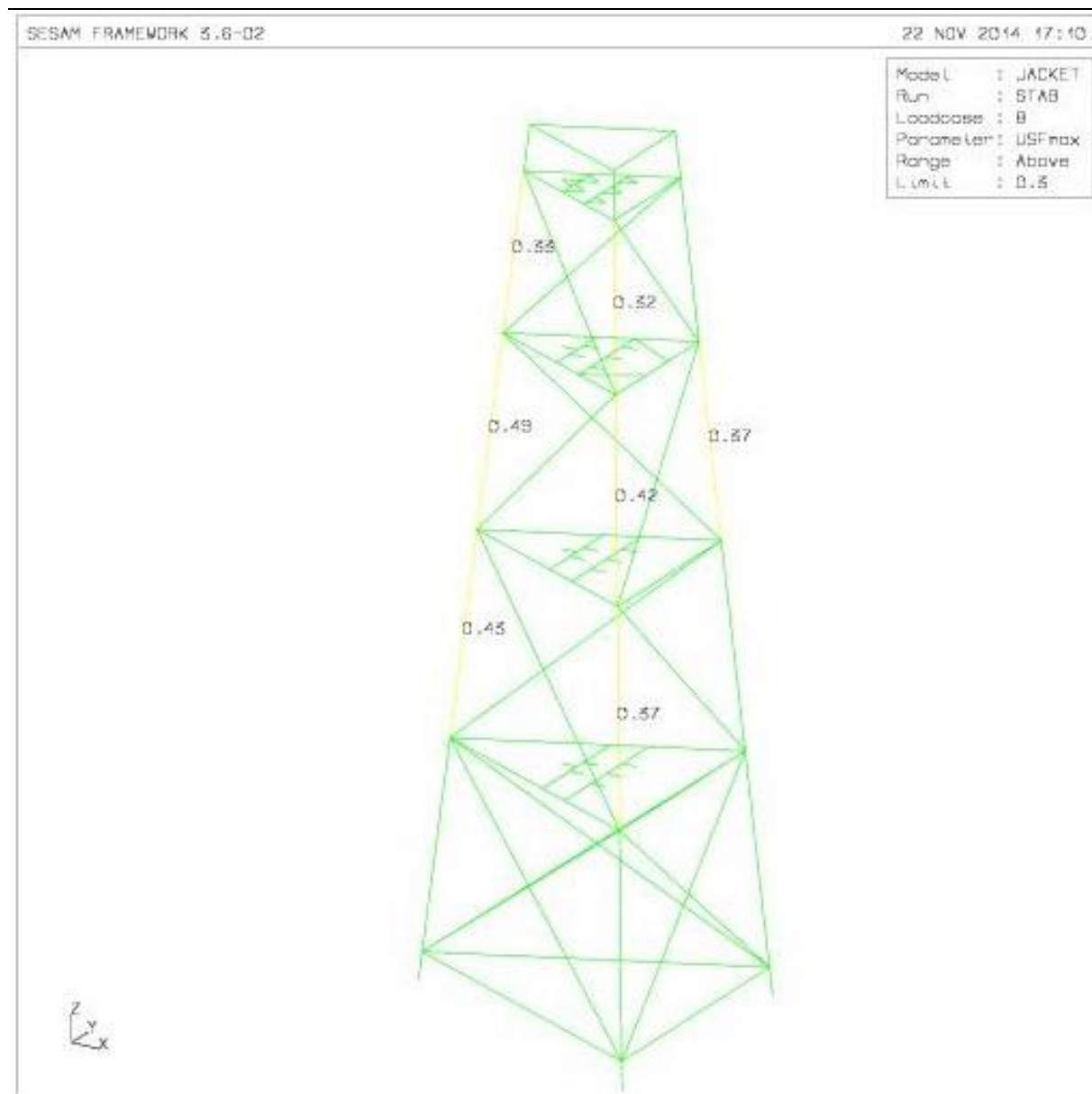


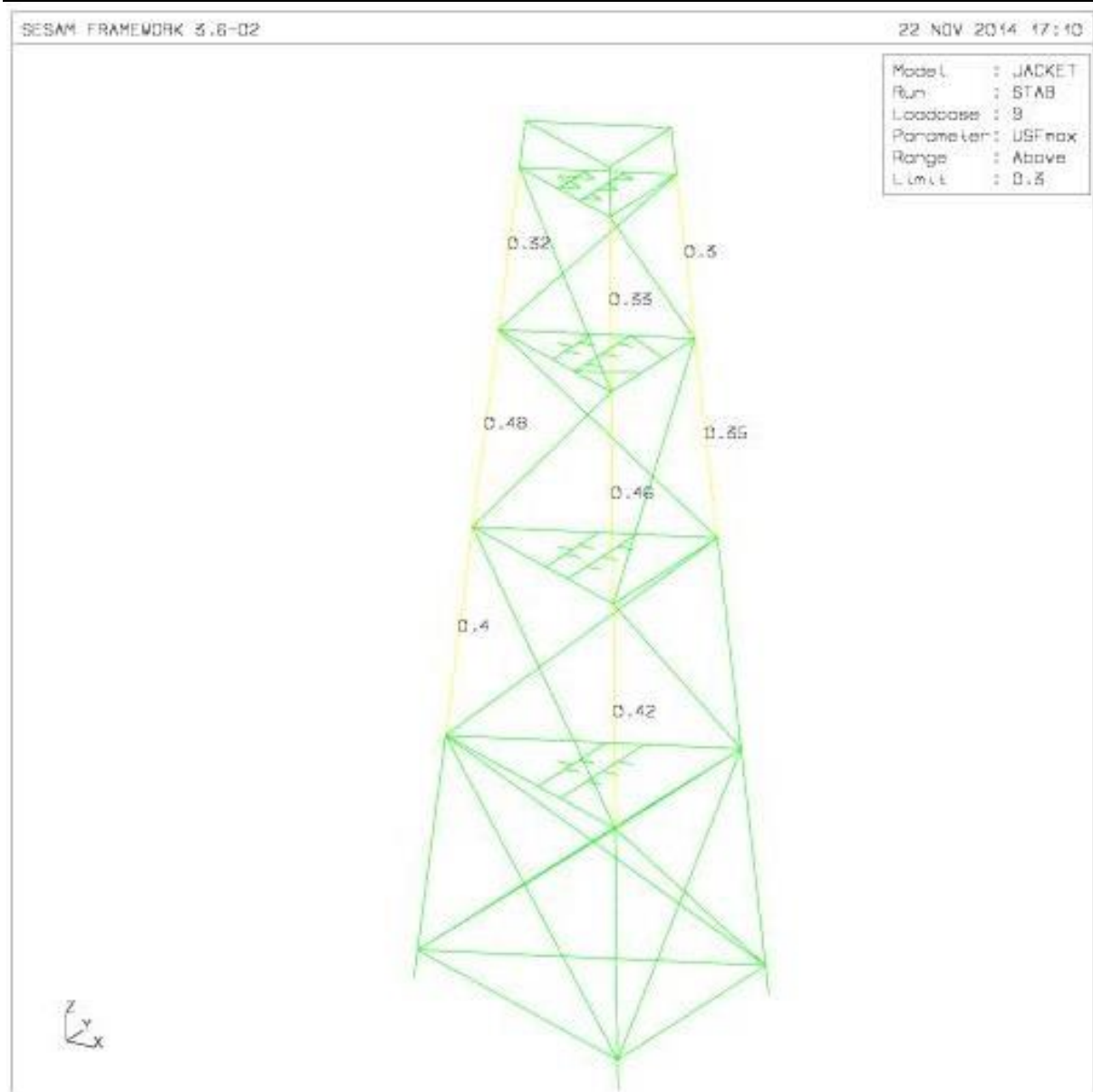


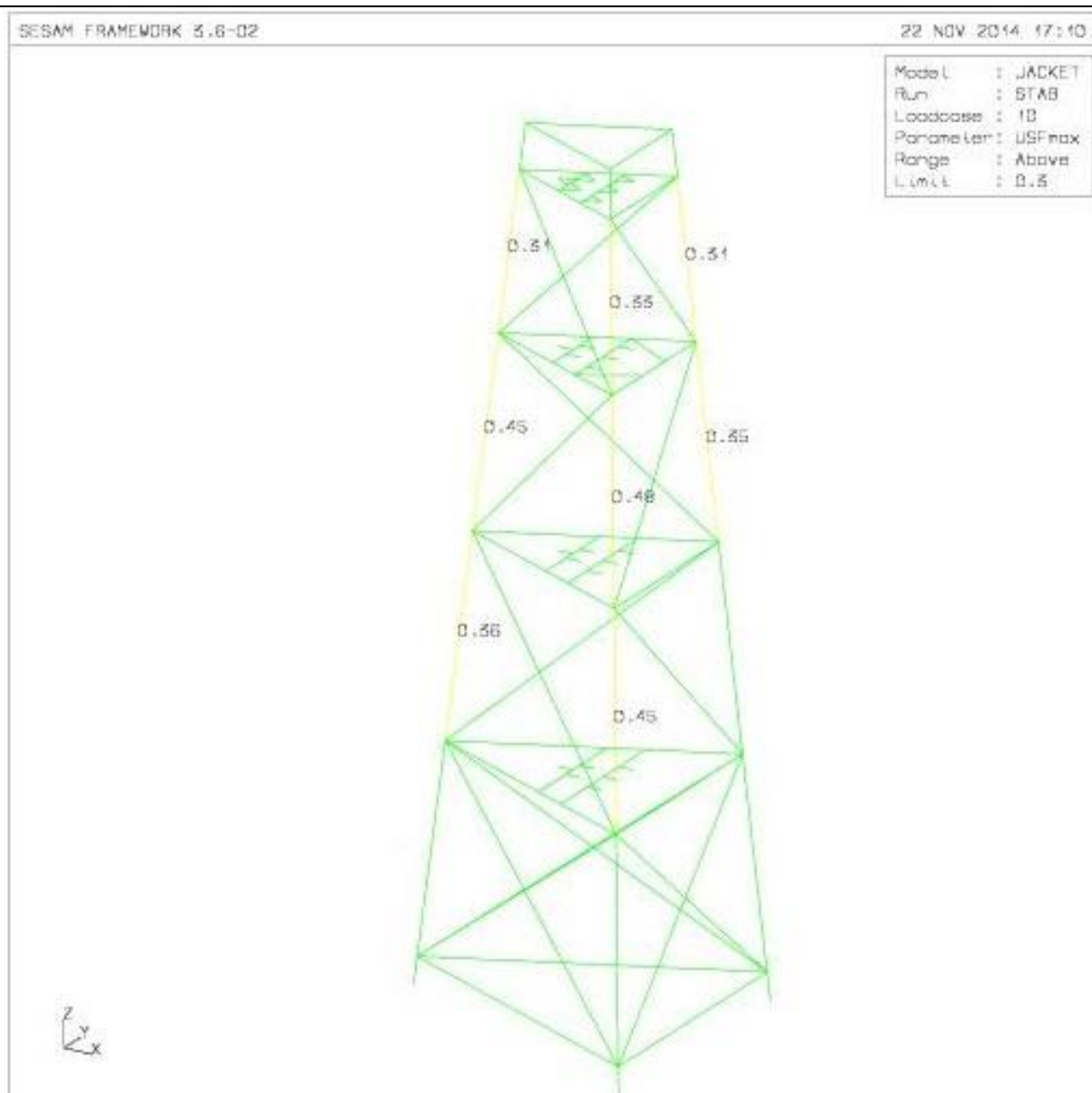


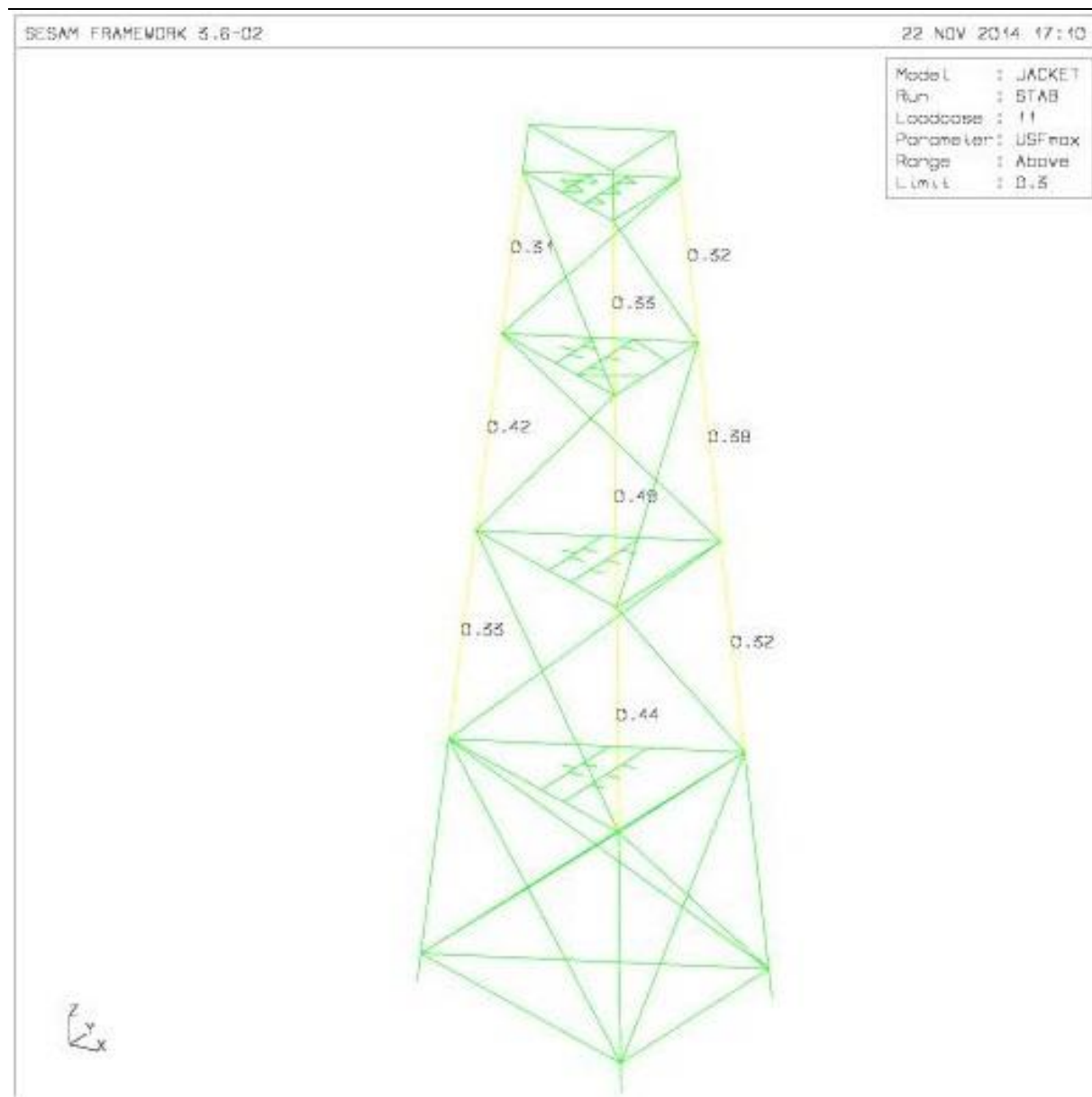


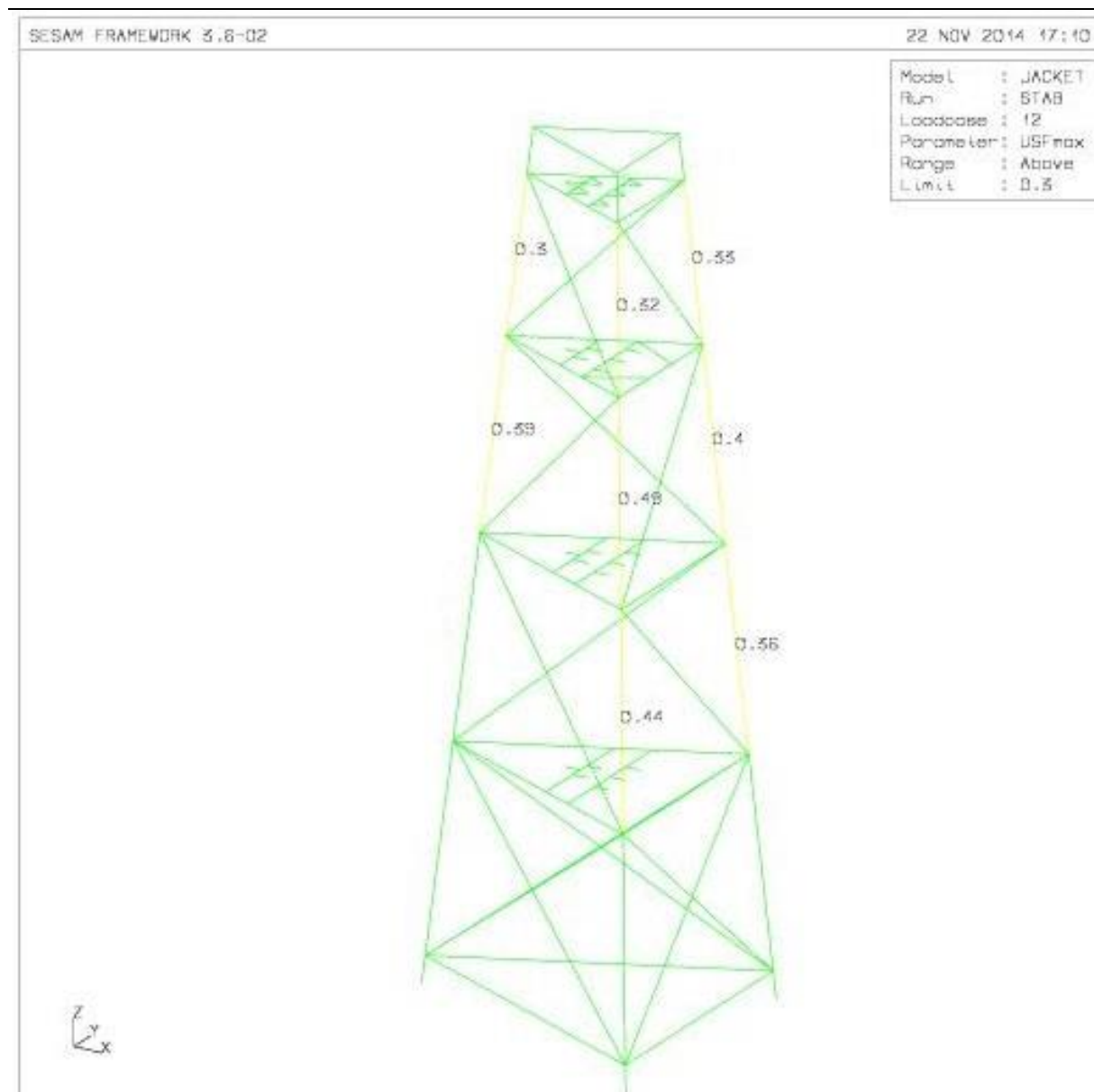




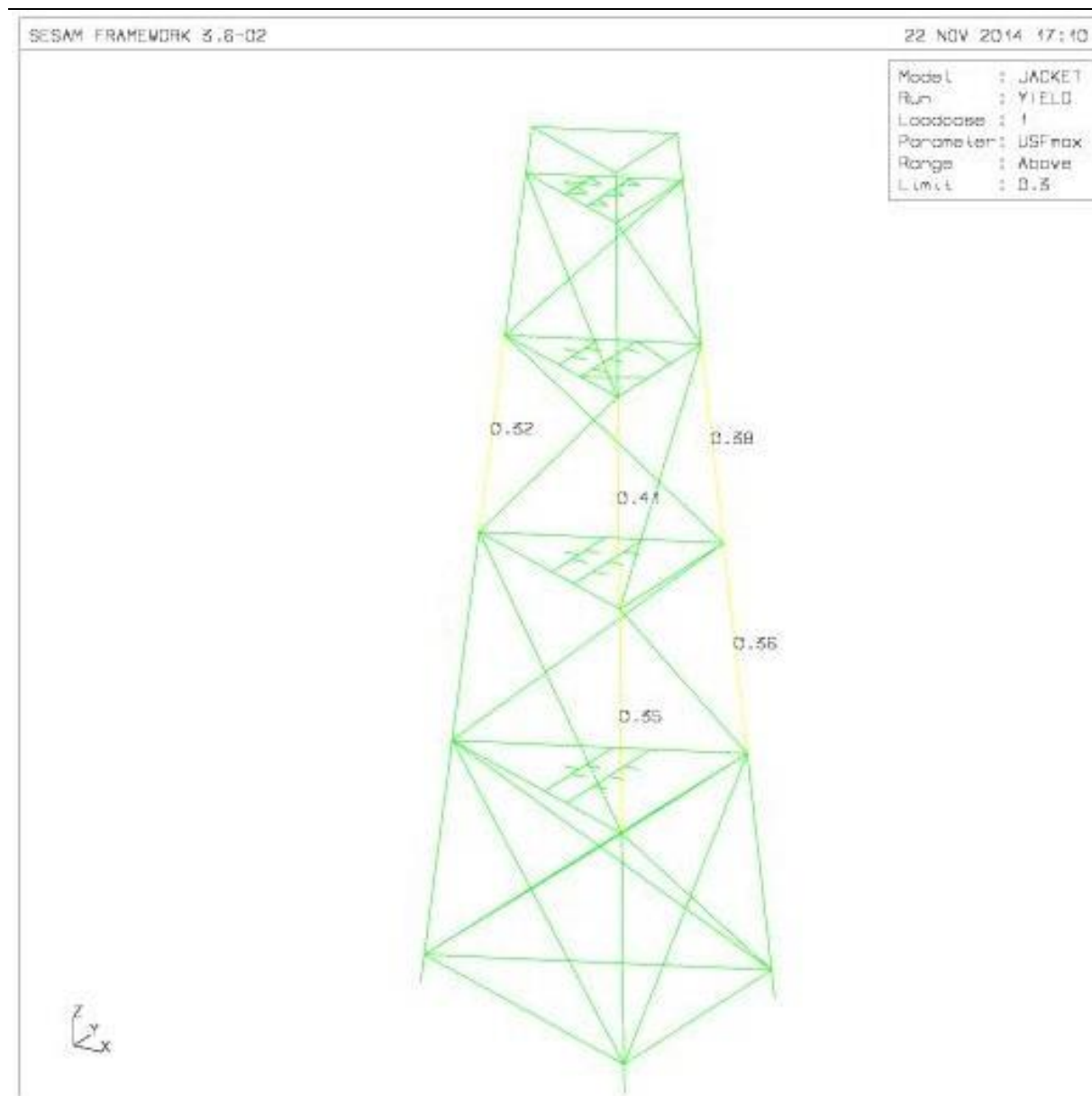


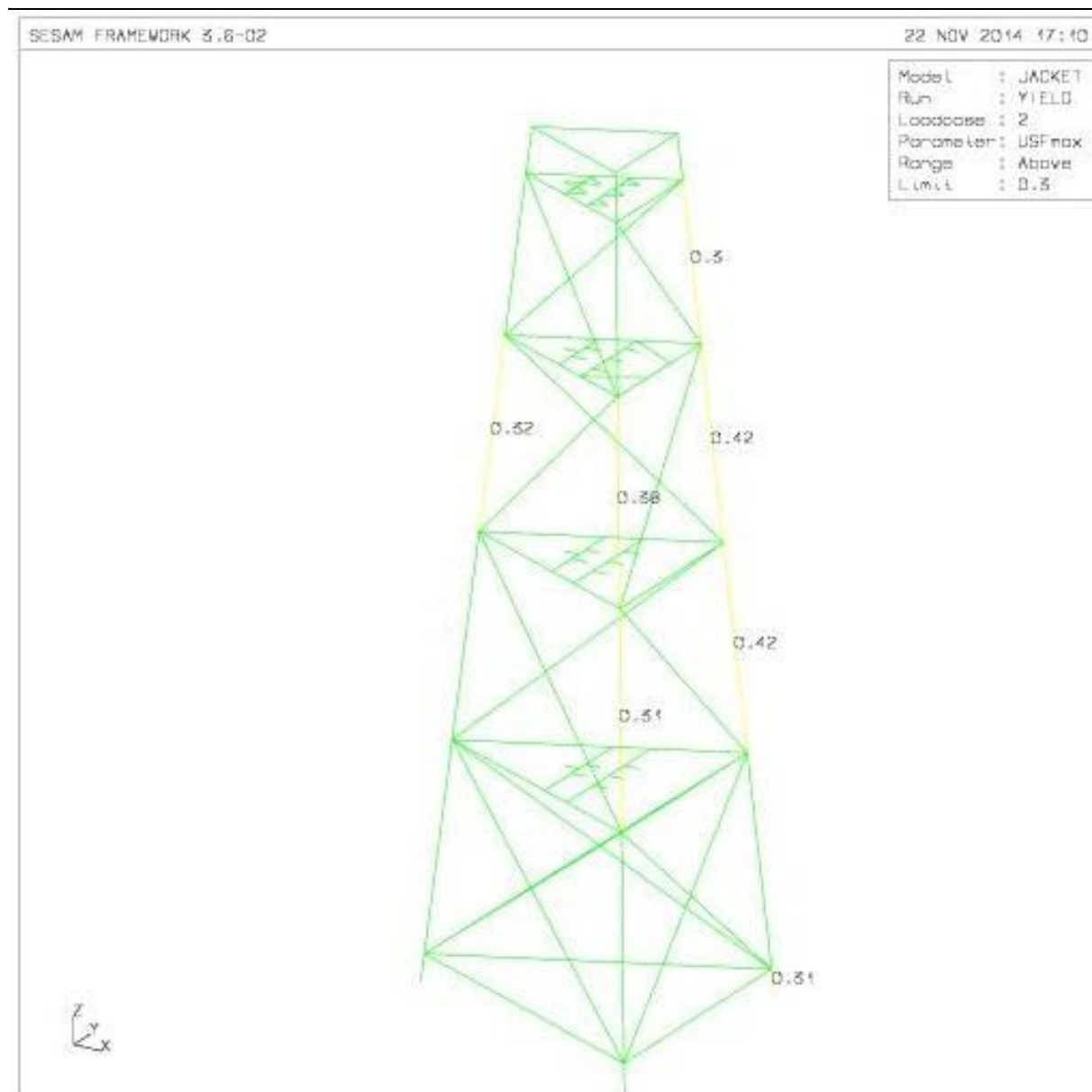


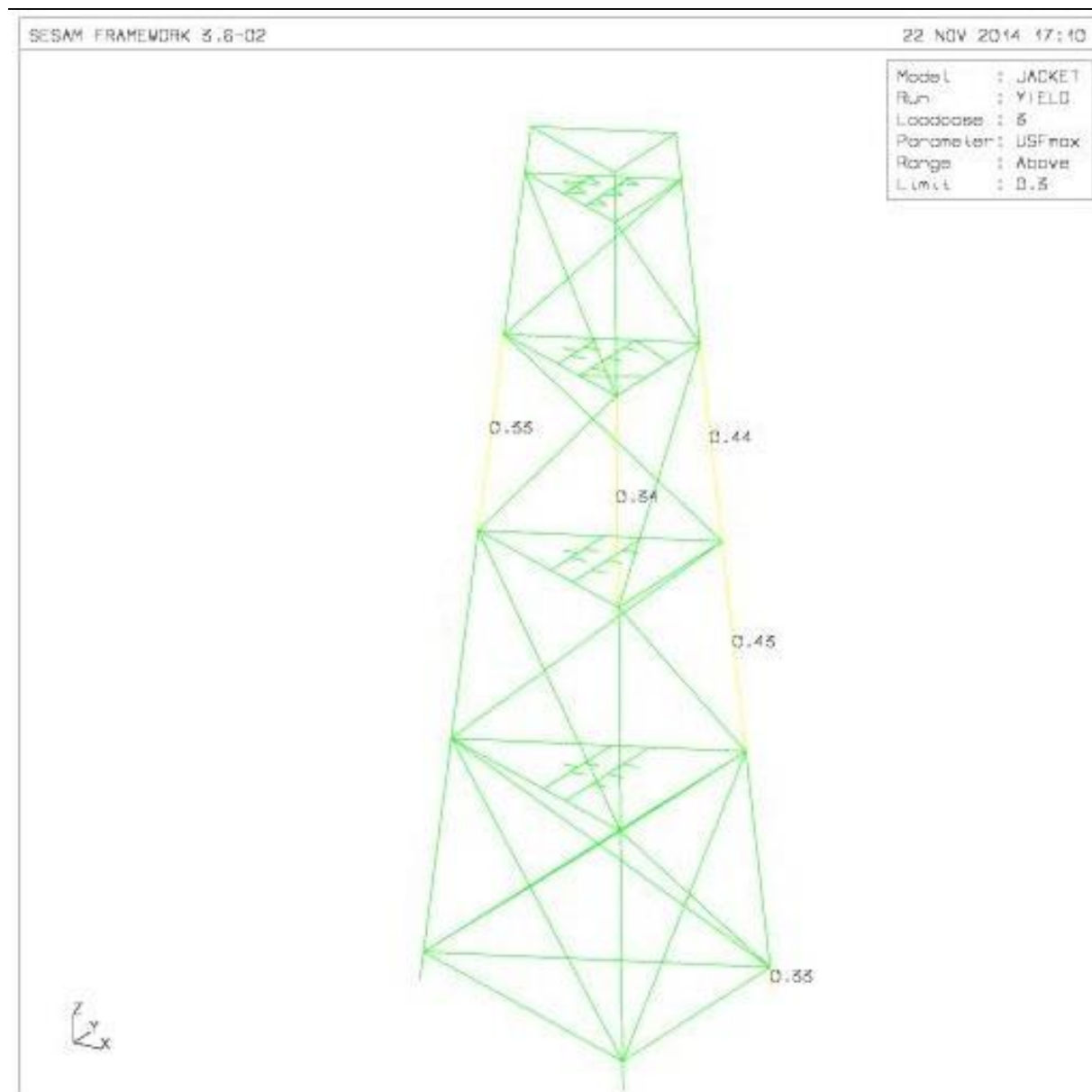


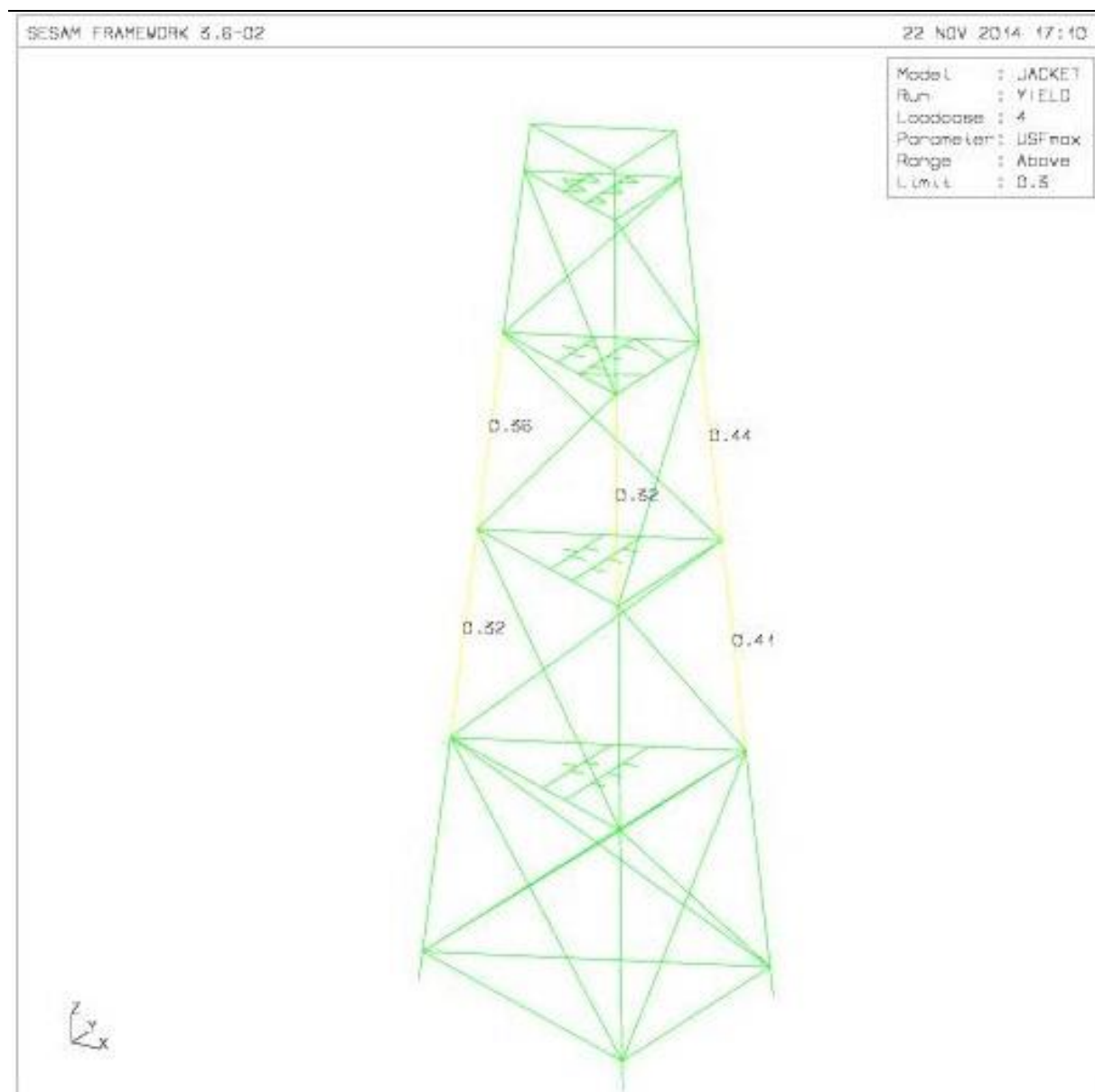


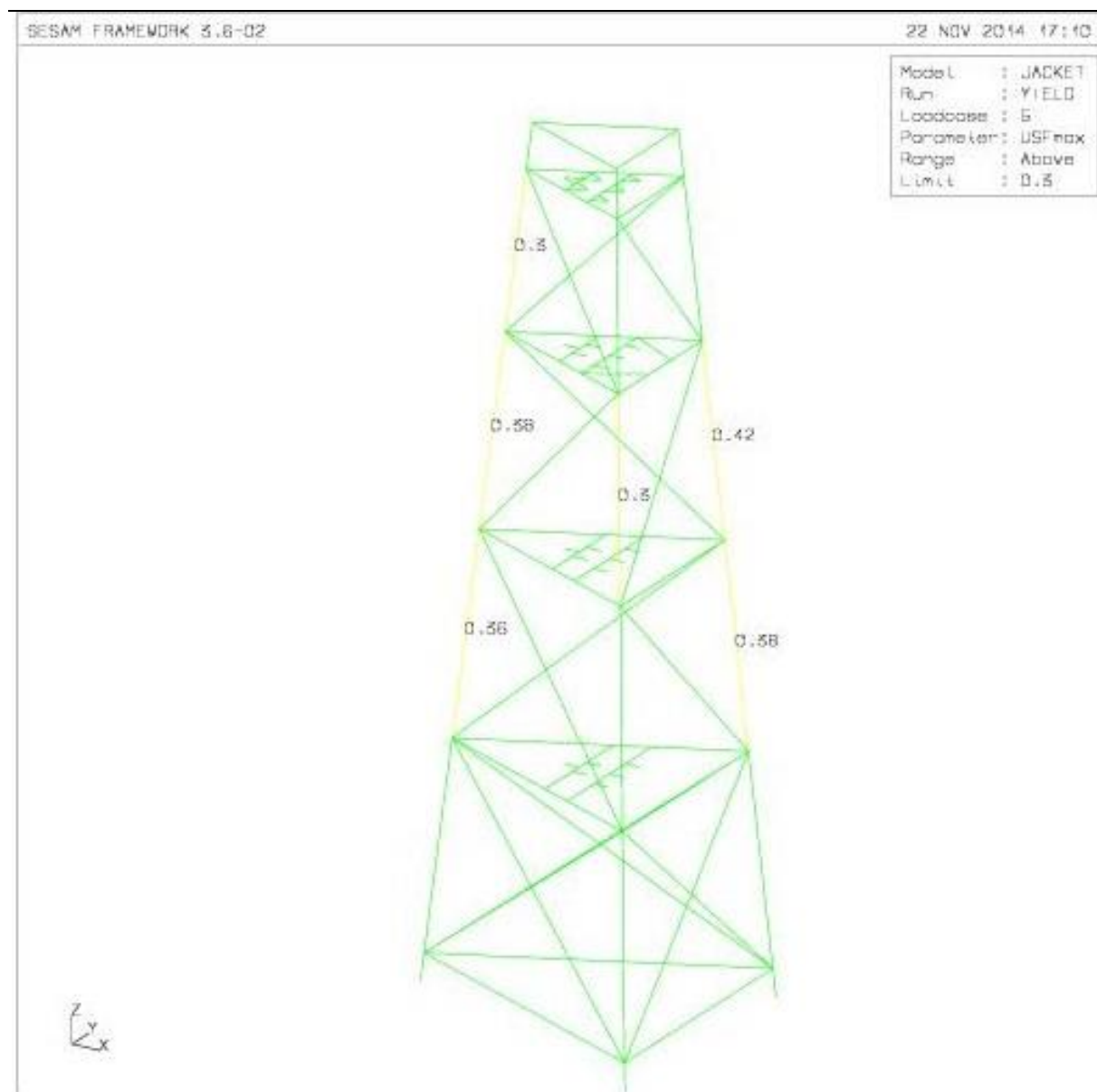


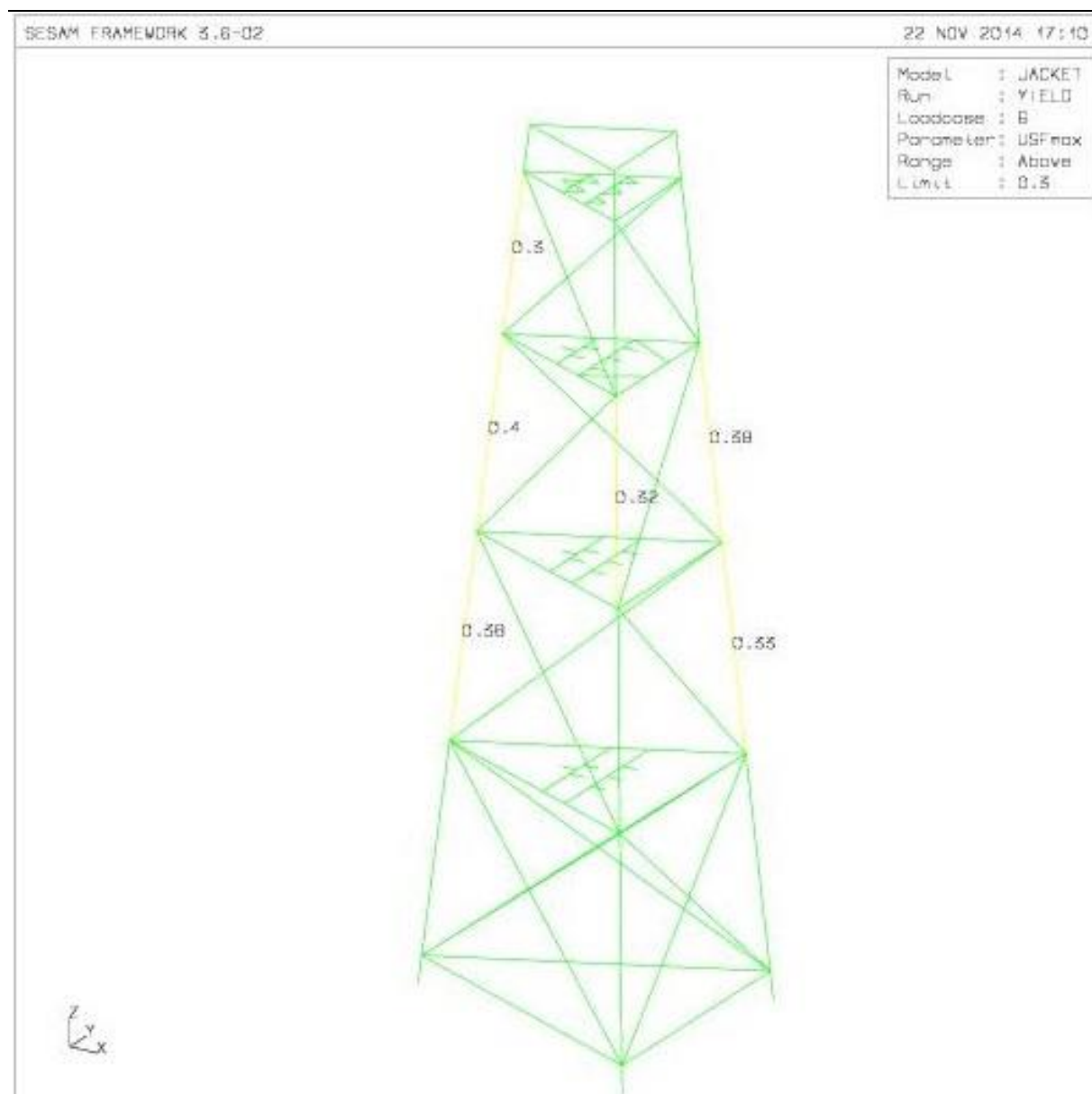


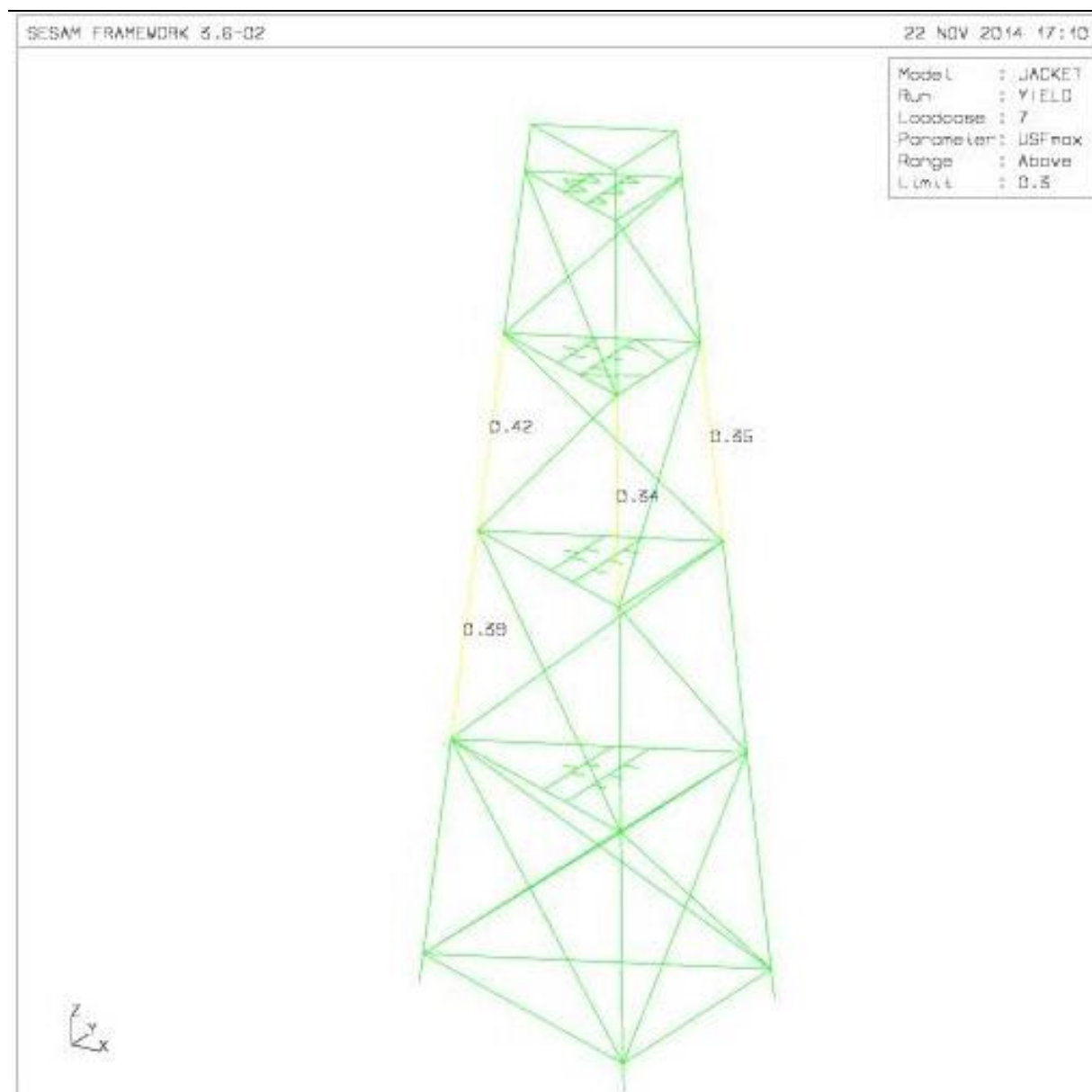


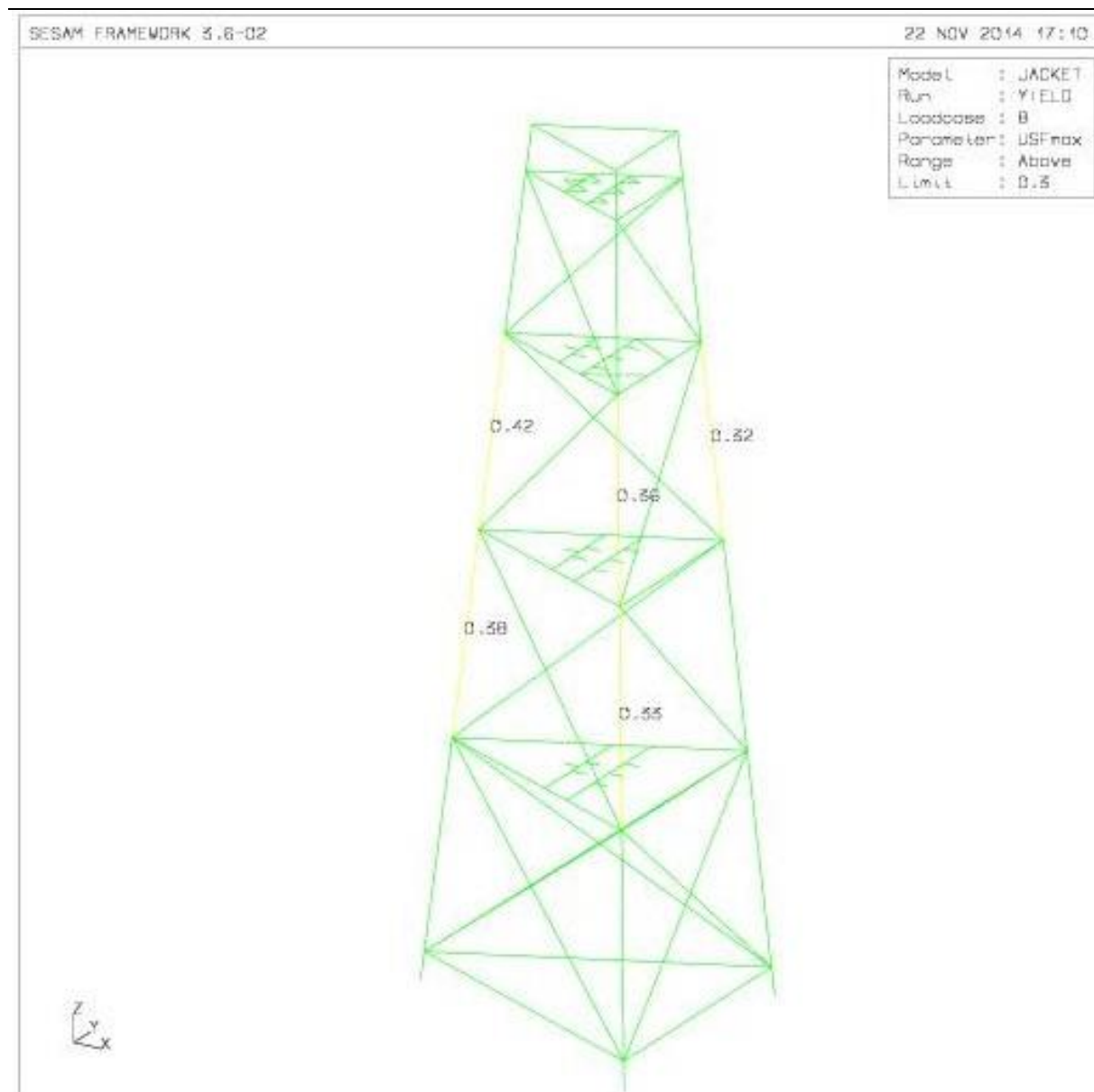




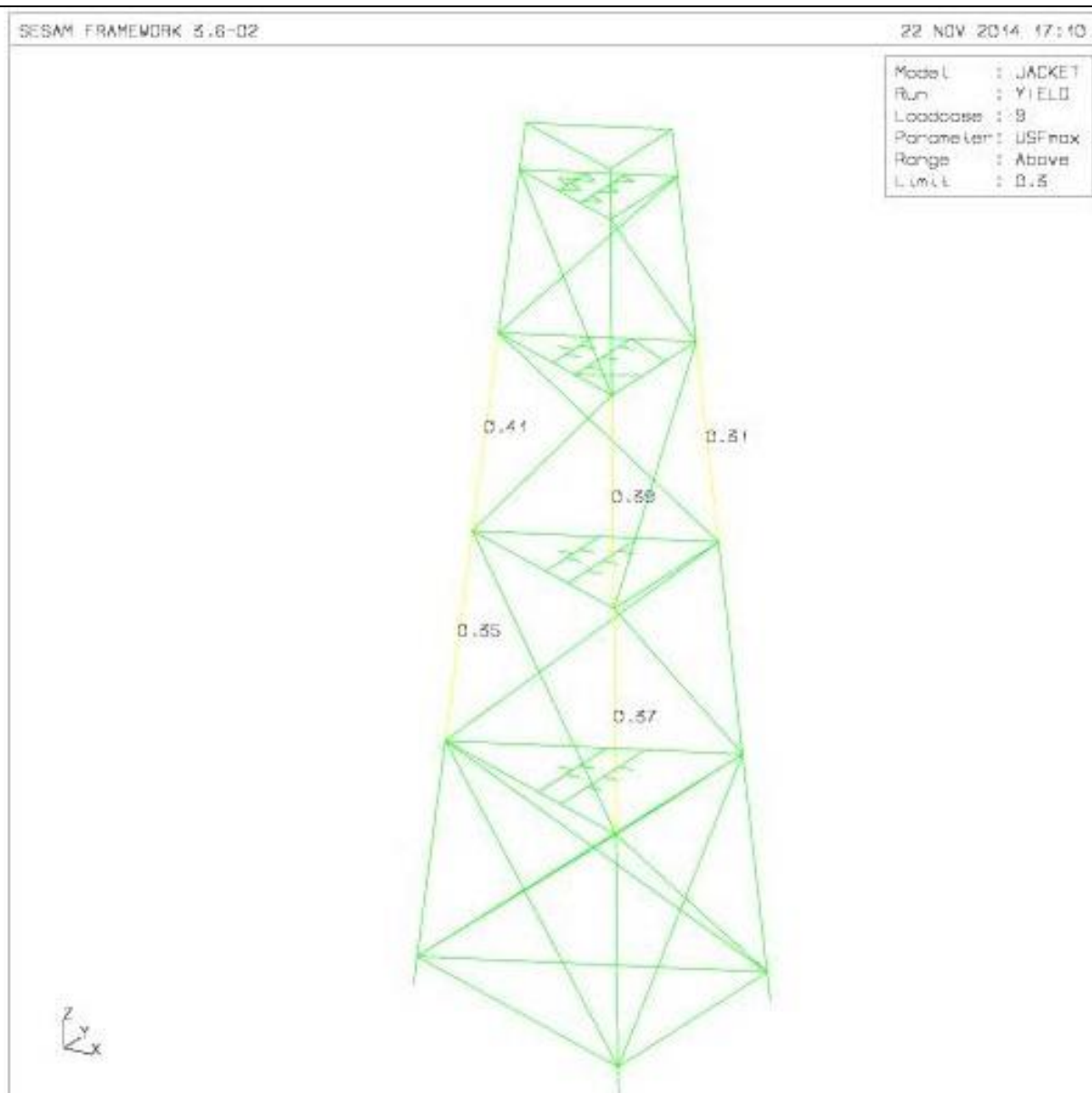


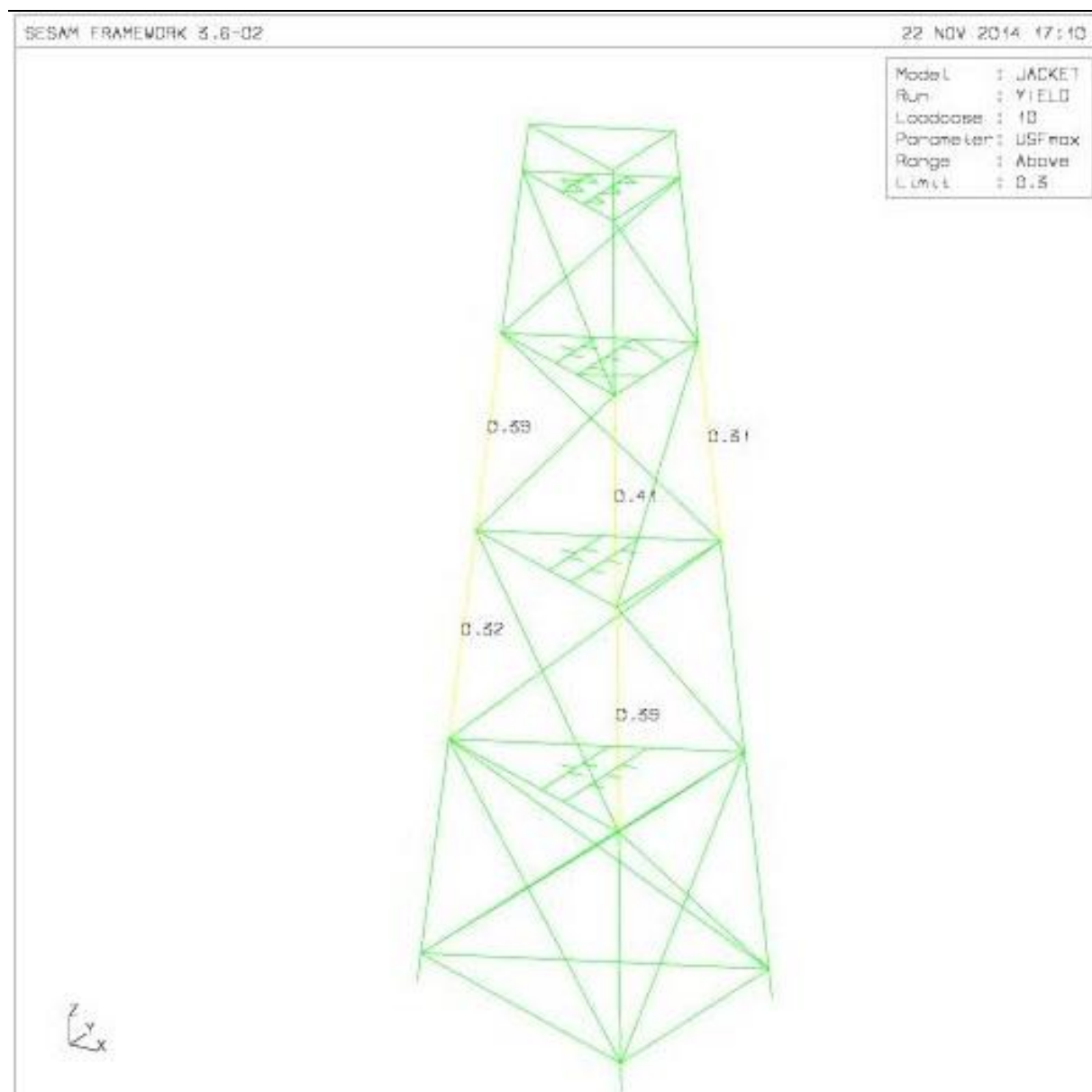


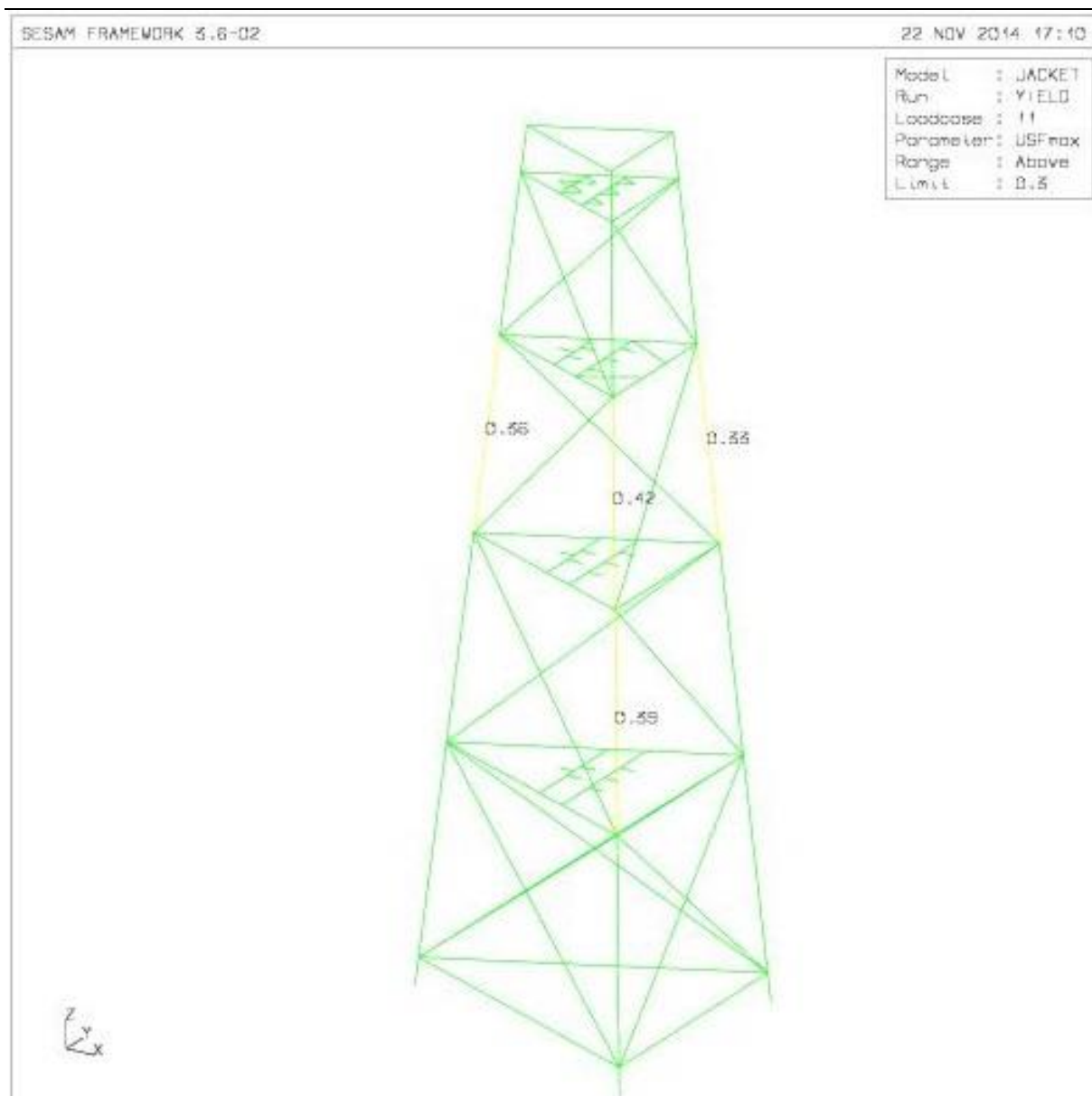


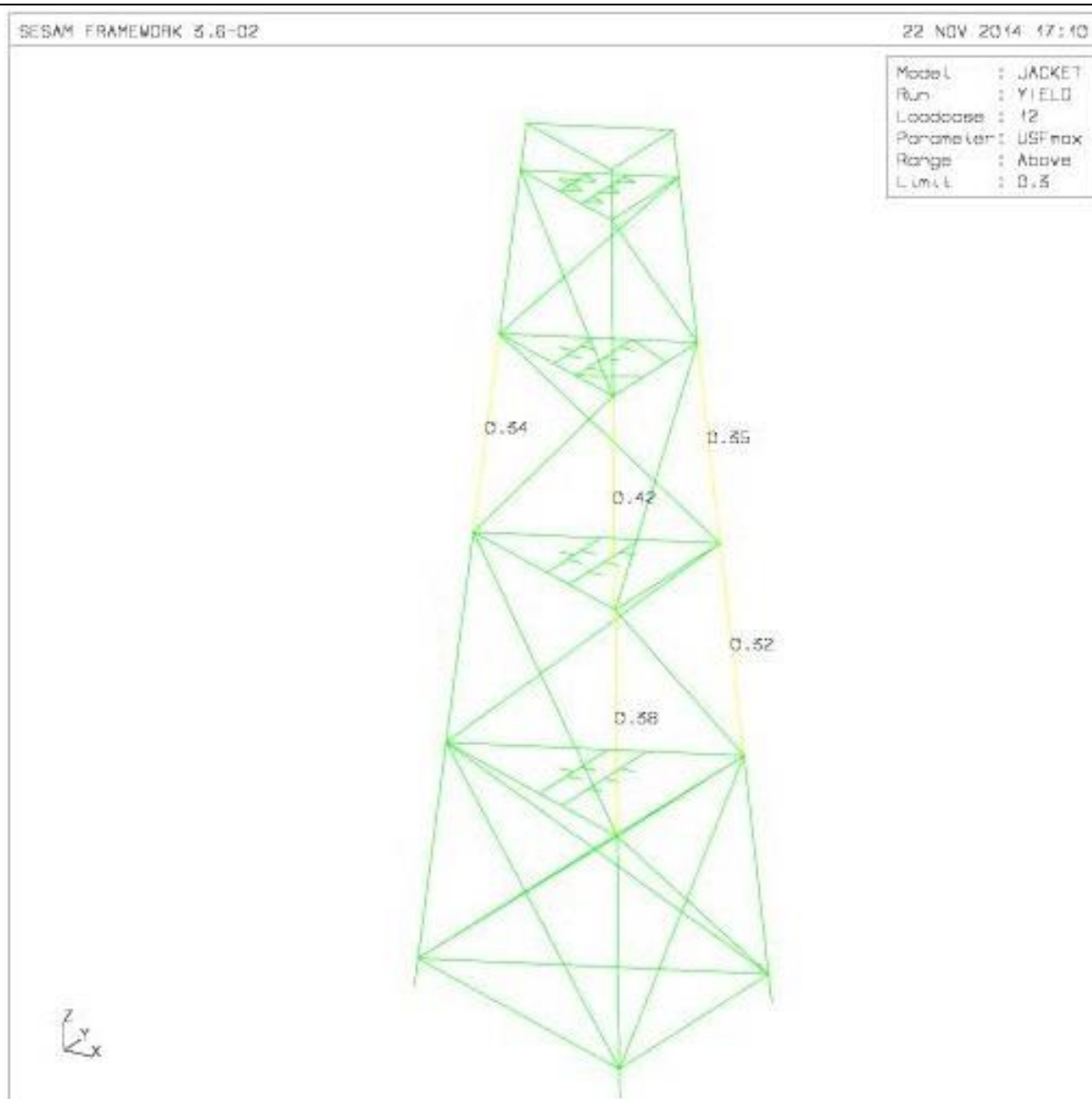




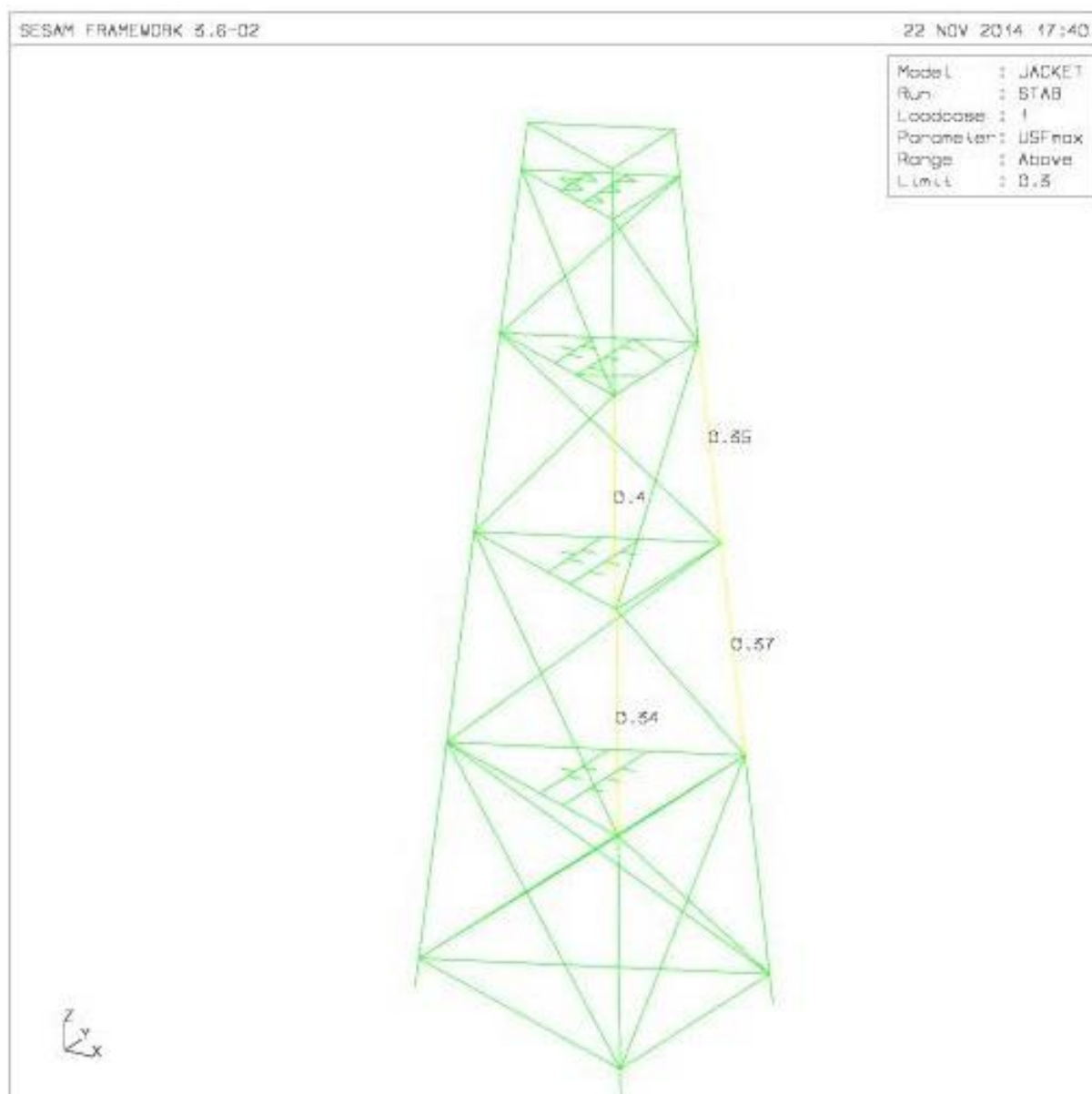


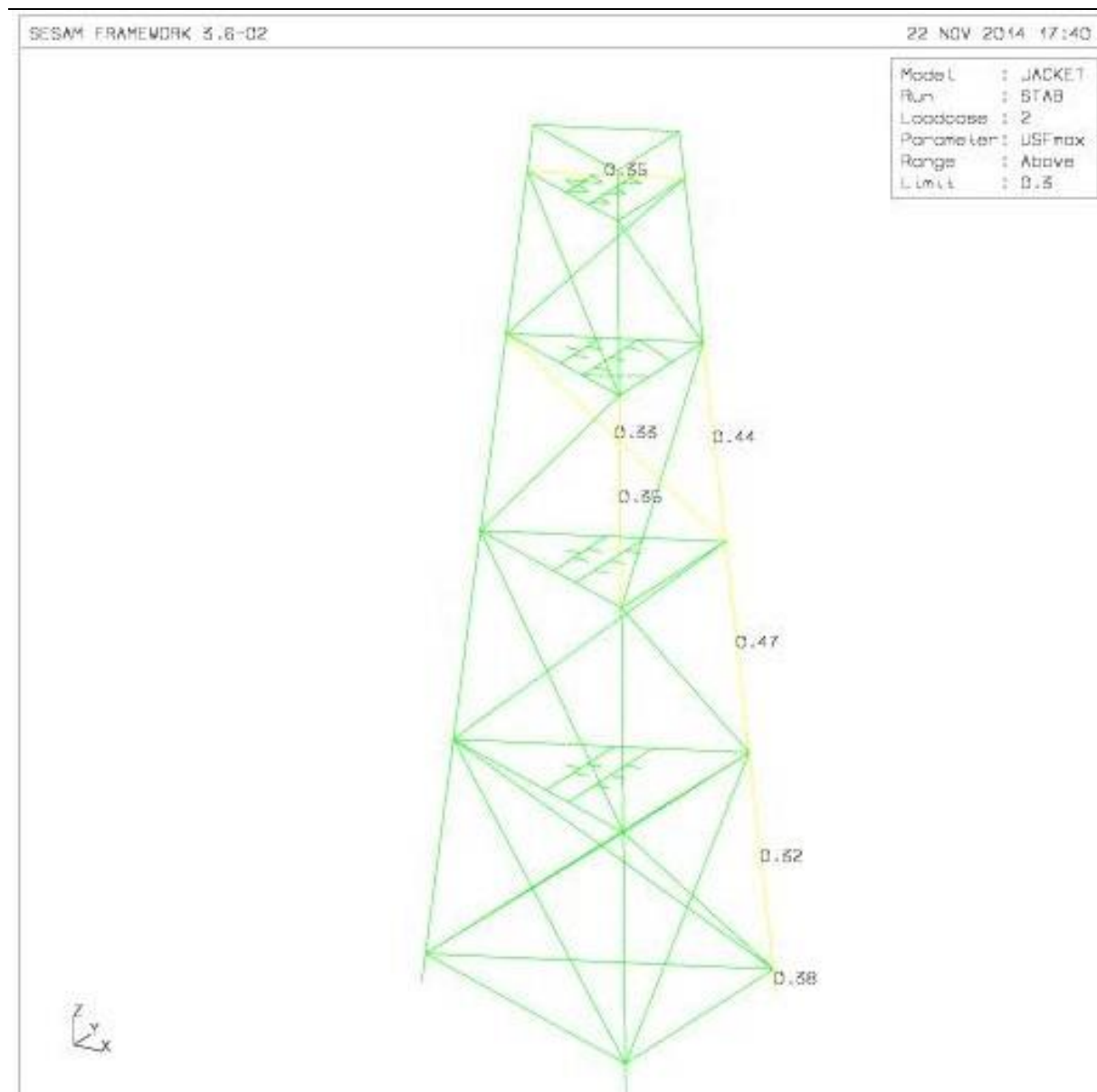


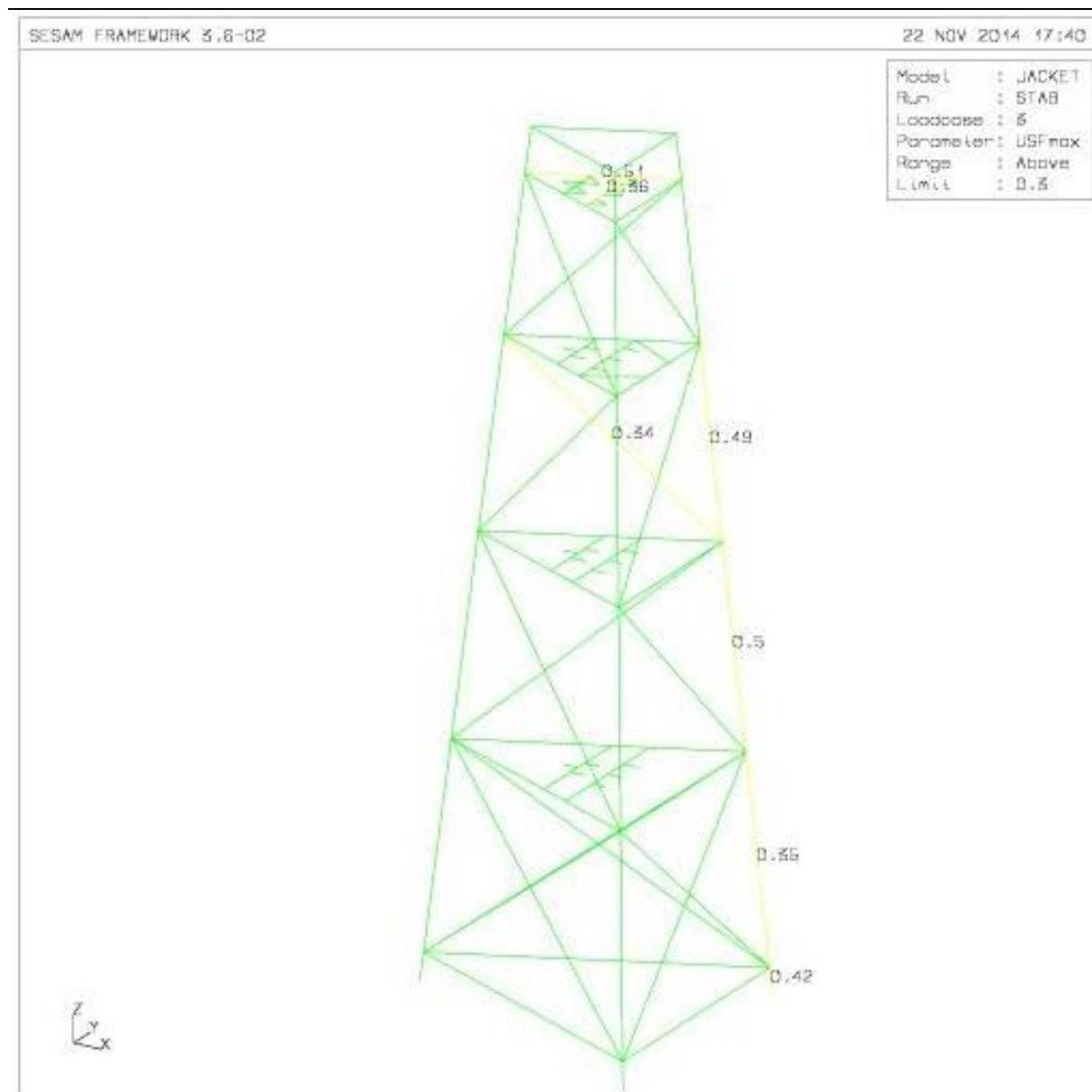


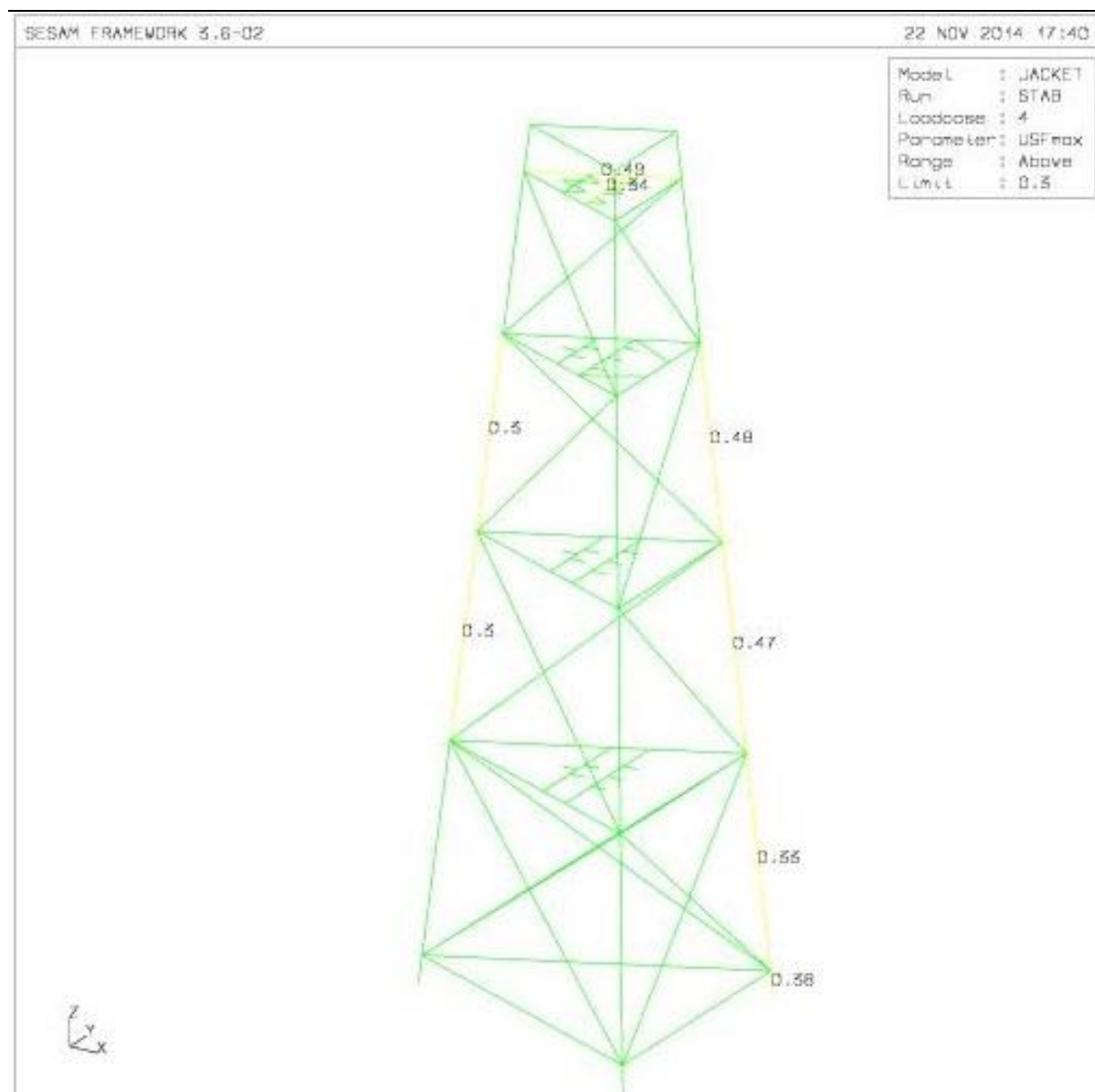


## Rezultati za ekstremne vremenske uvjete:

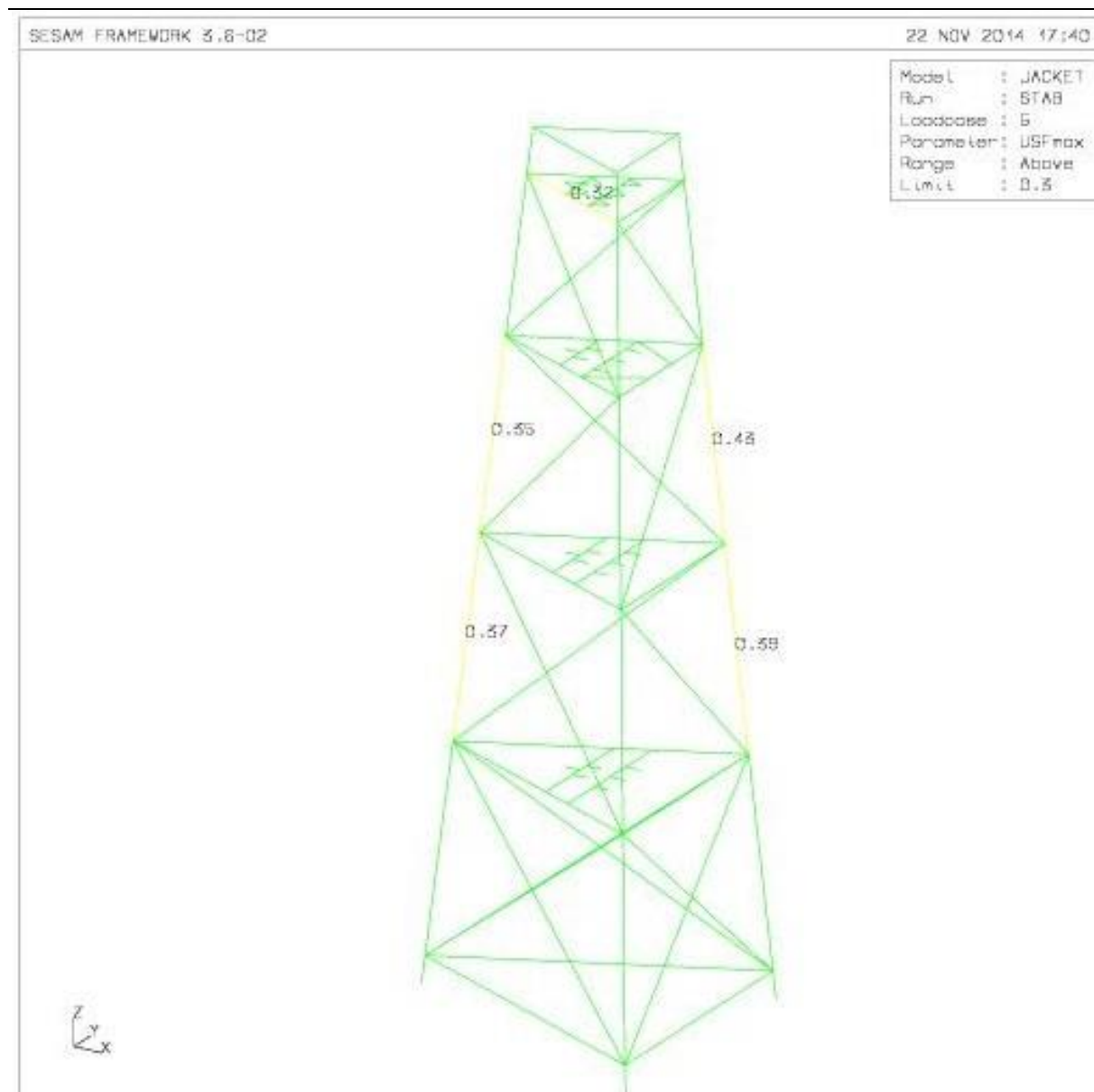


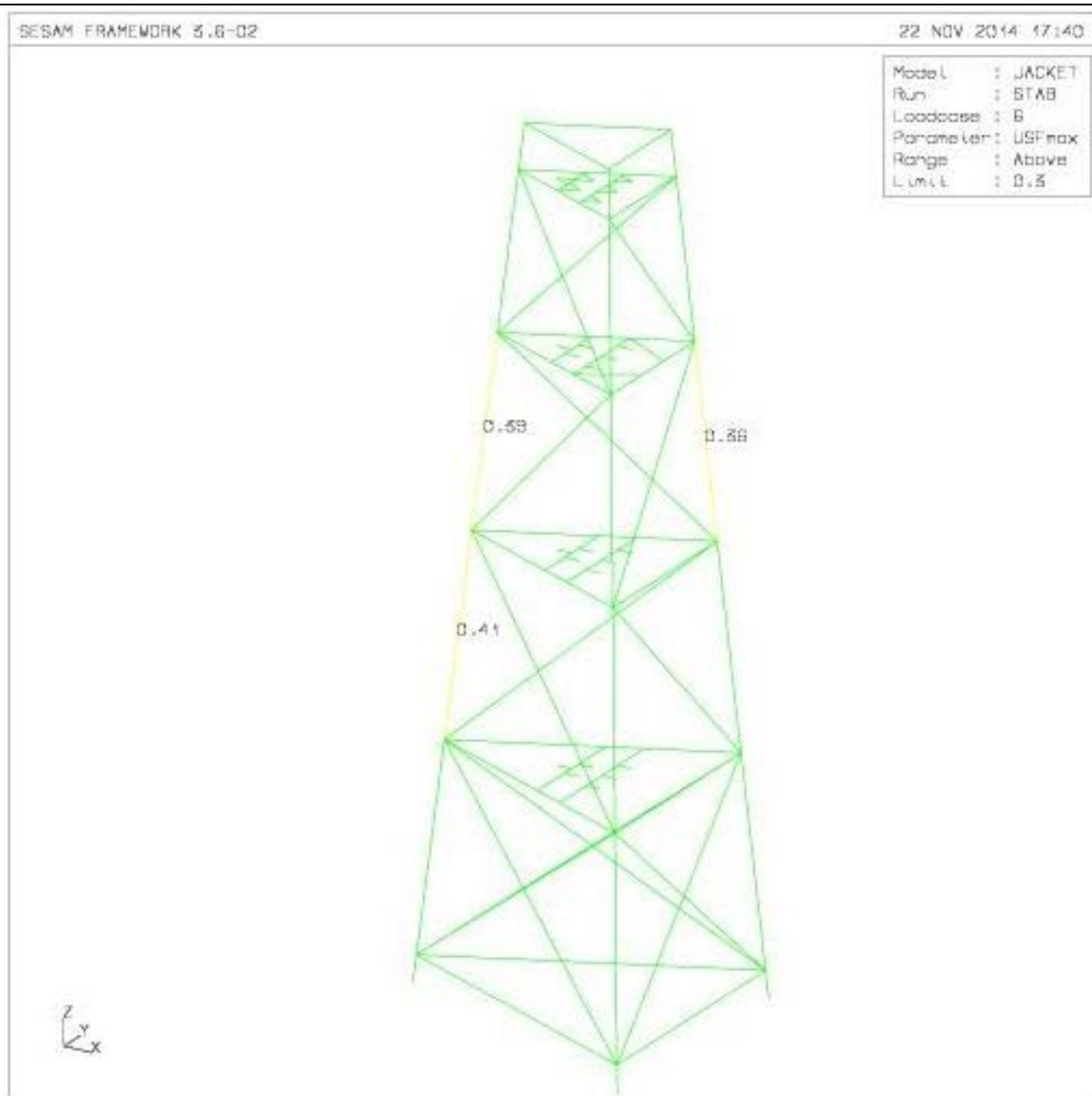


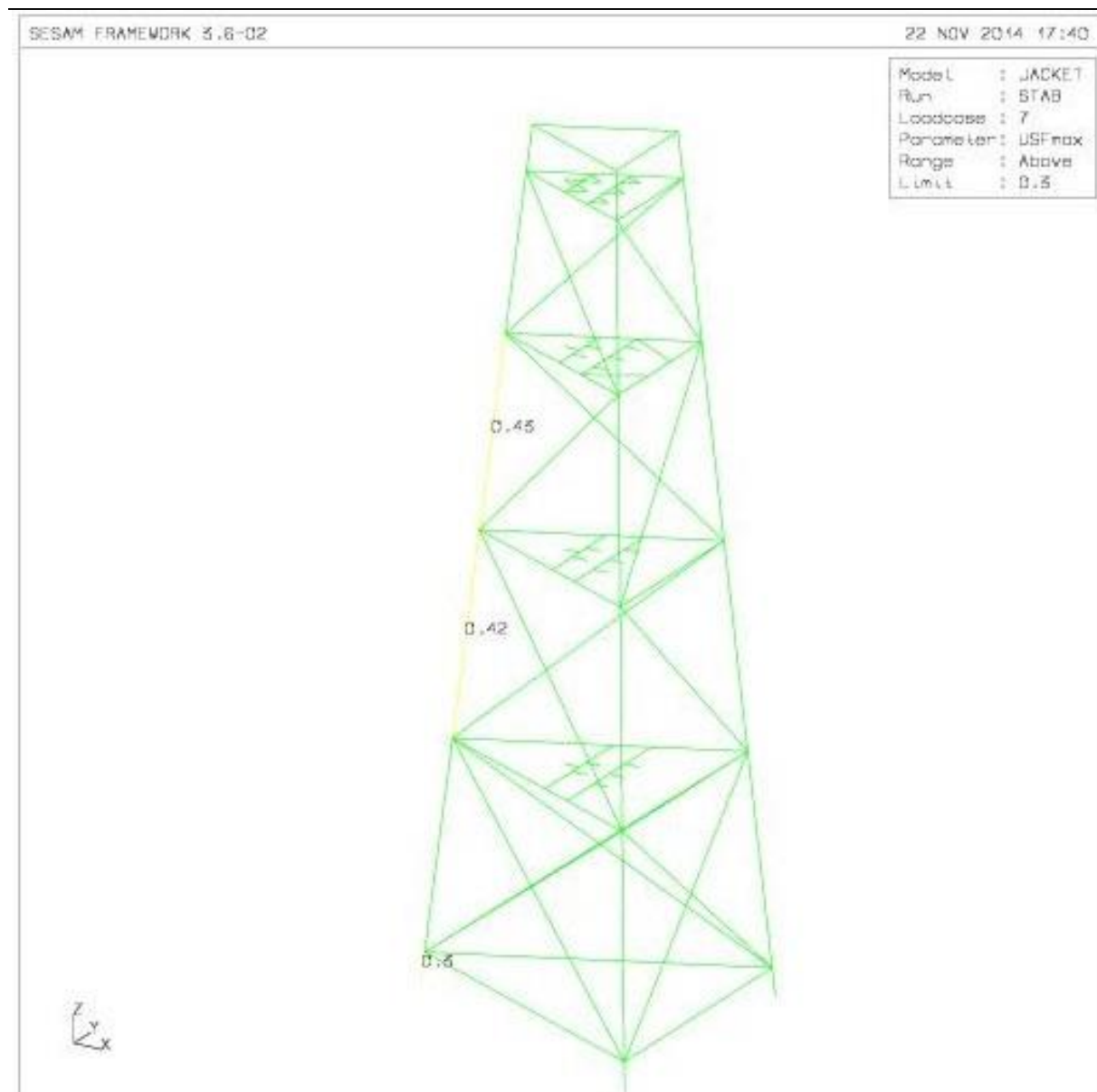


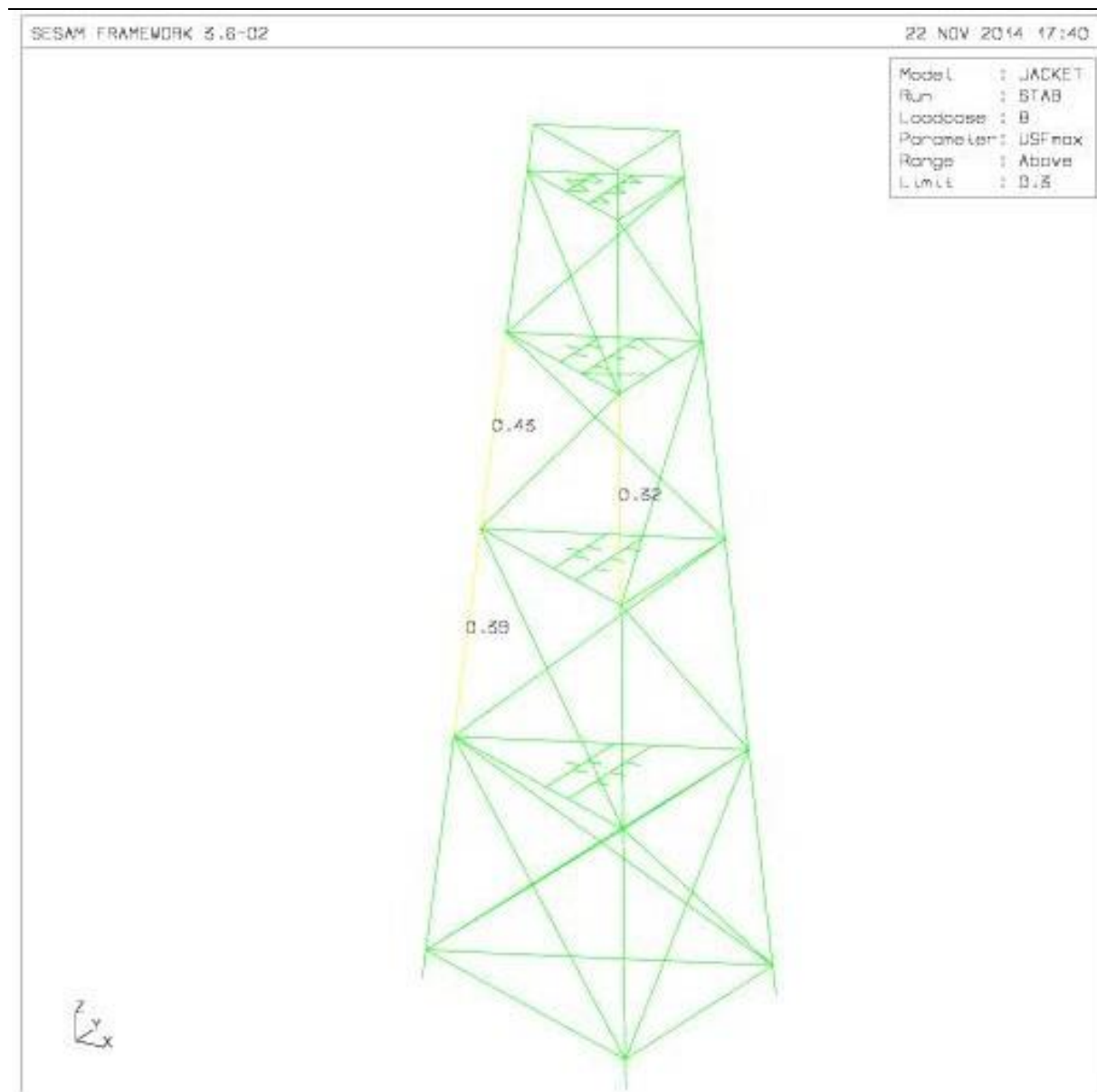


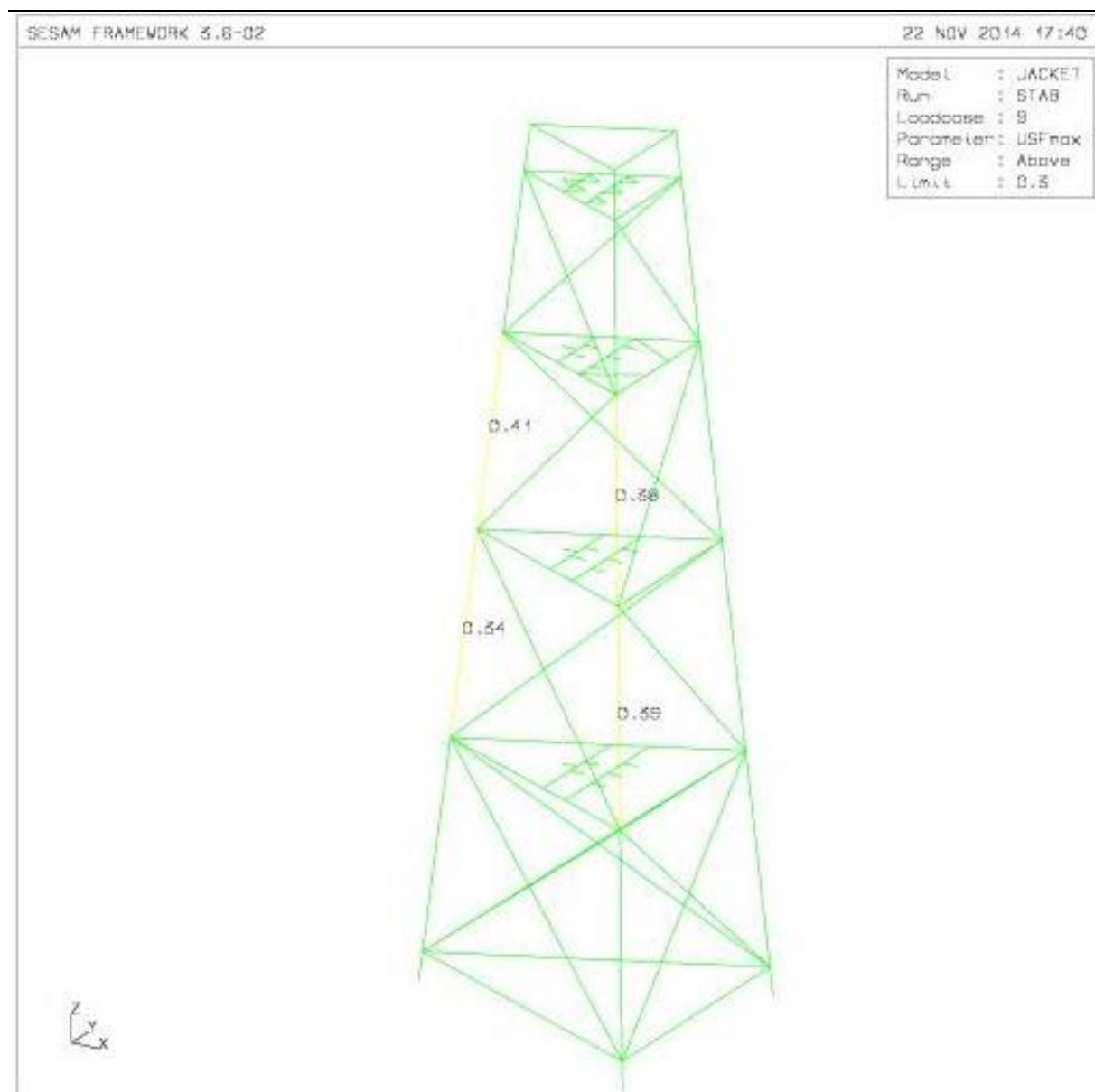


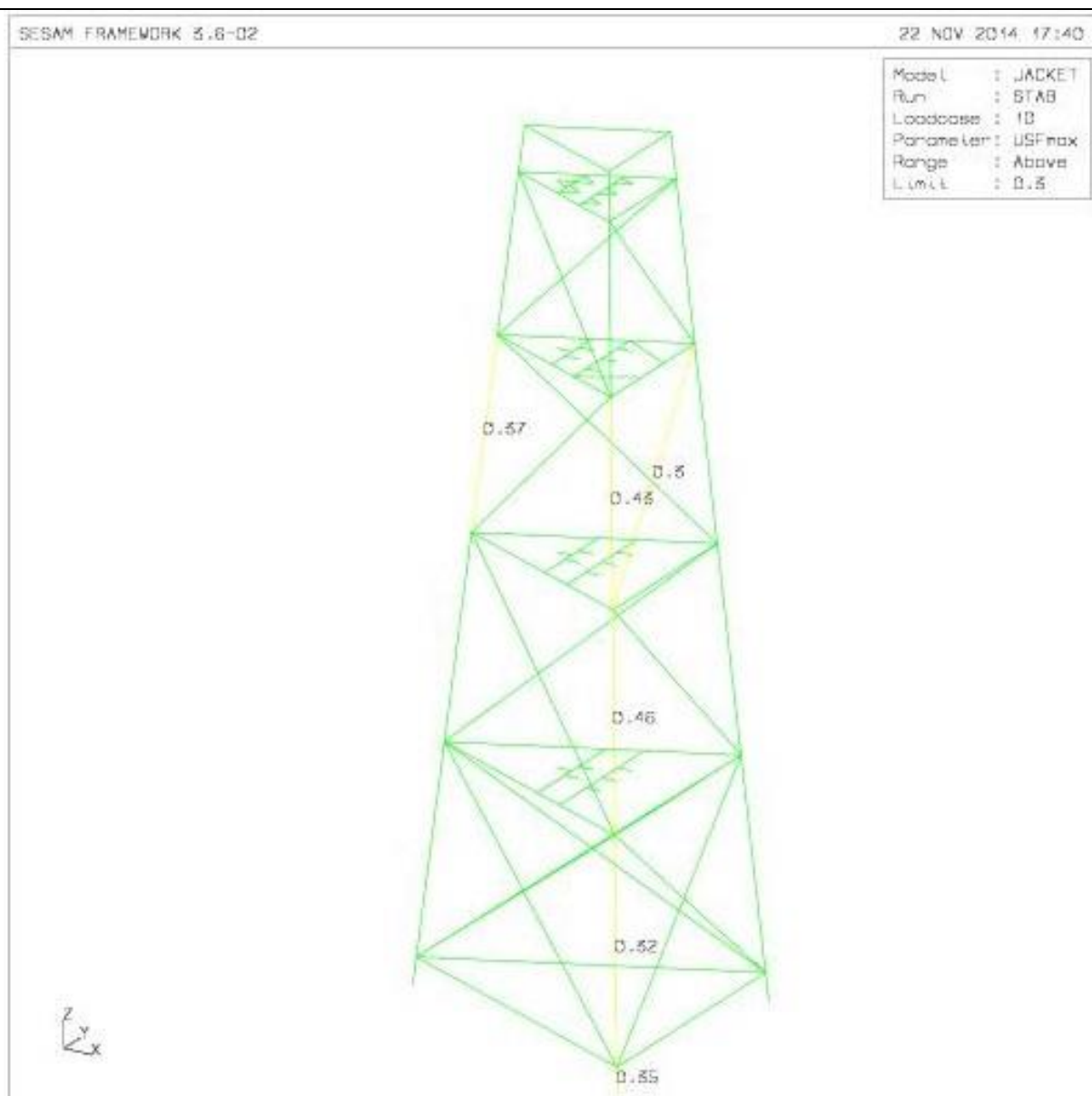


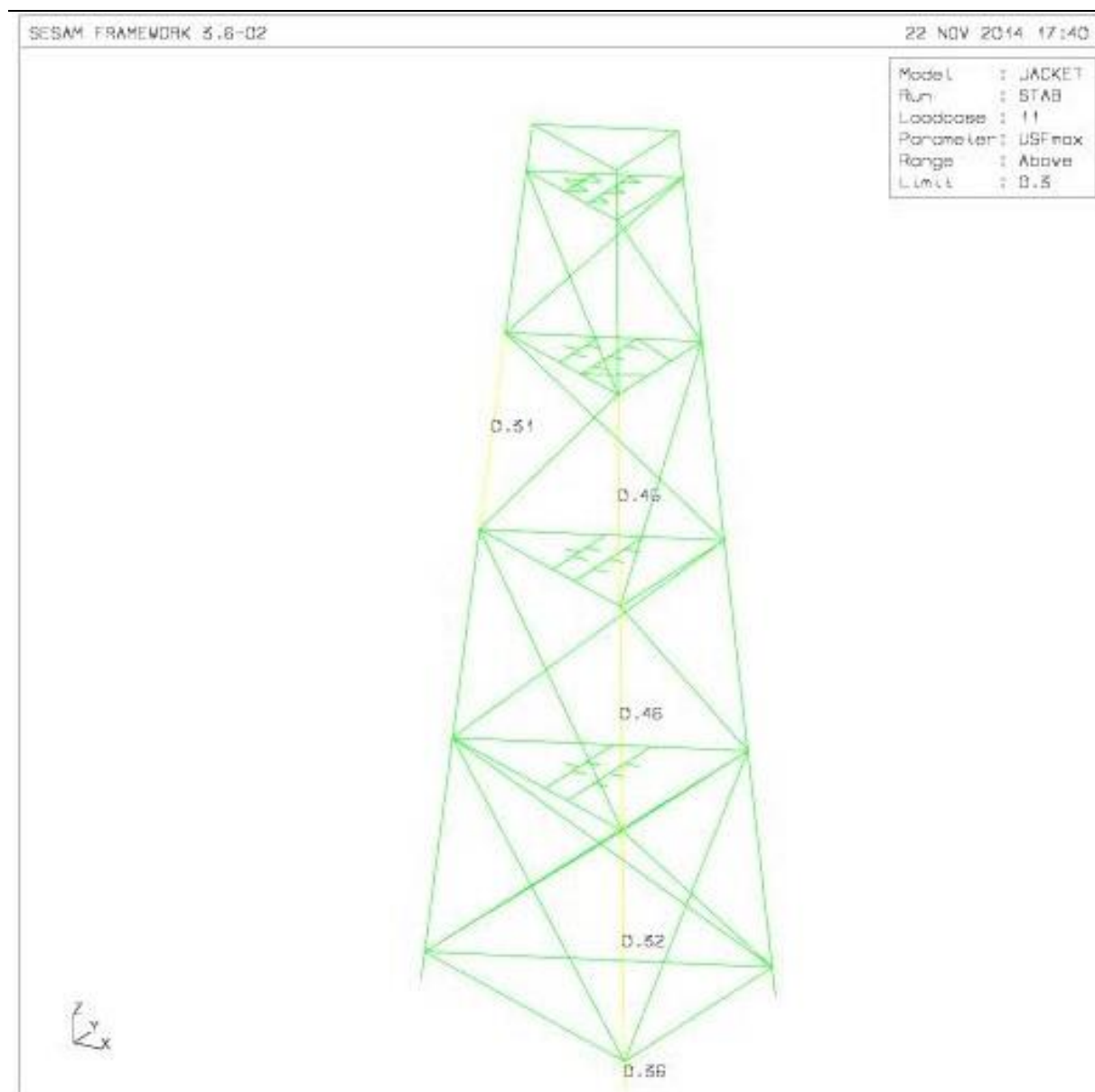


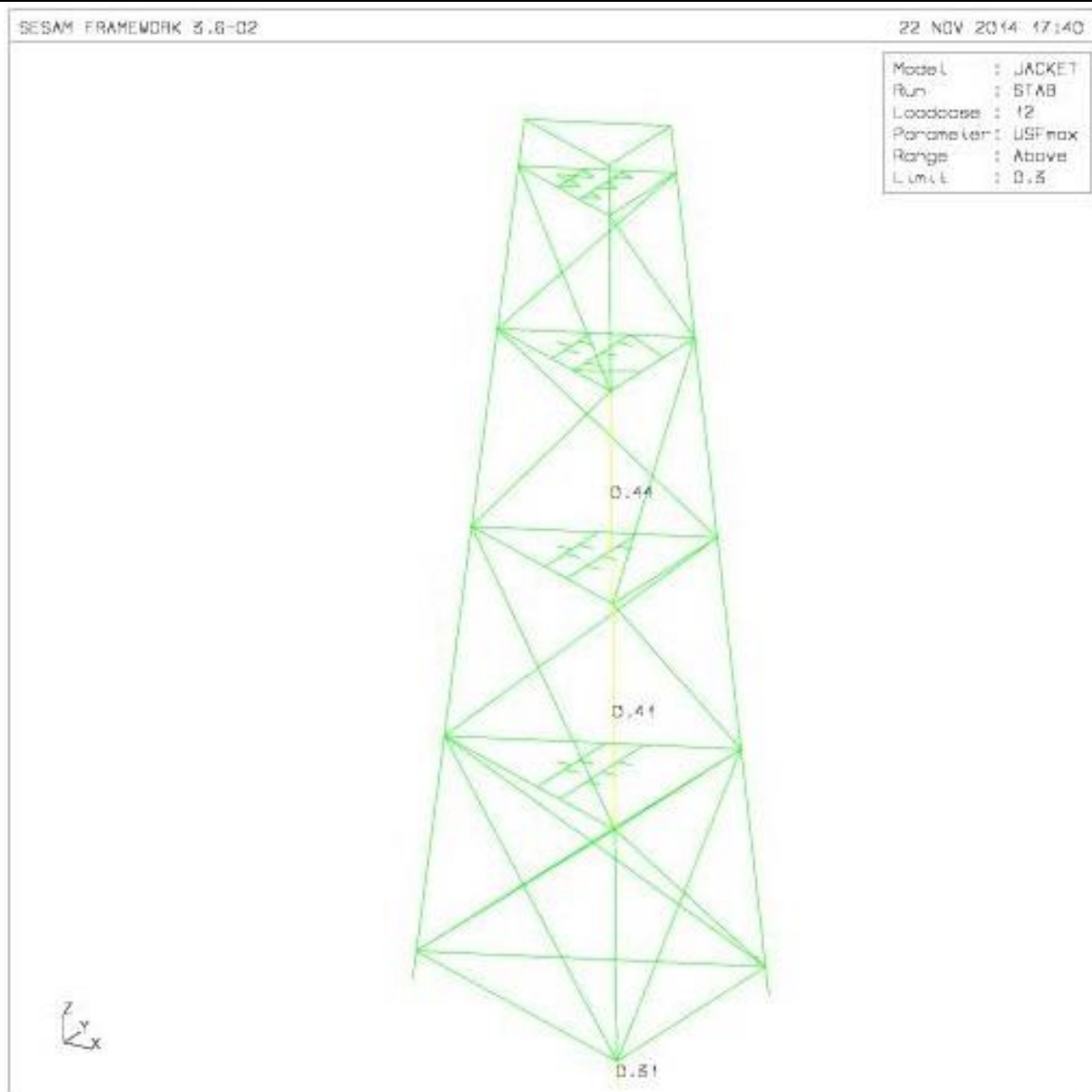




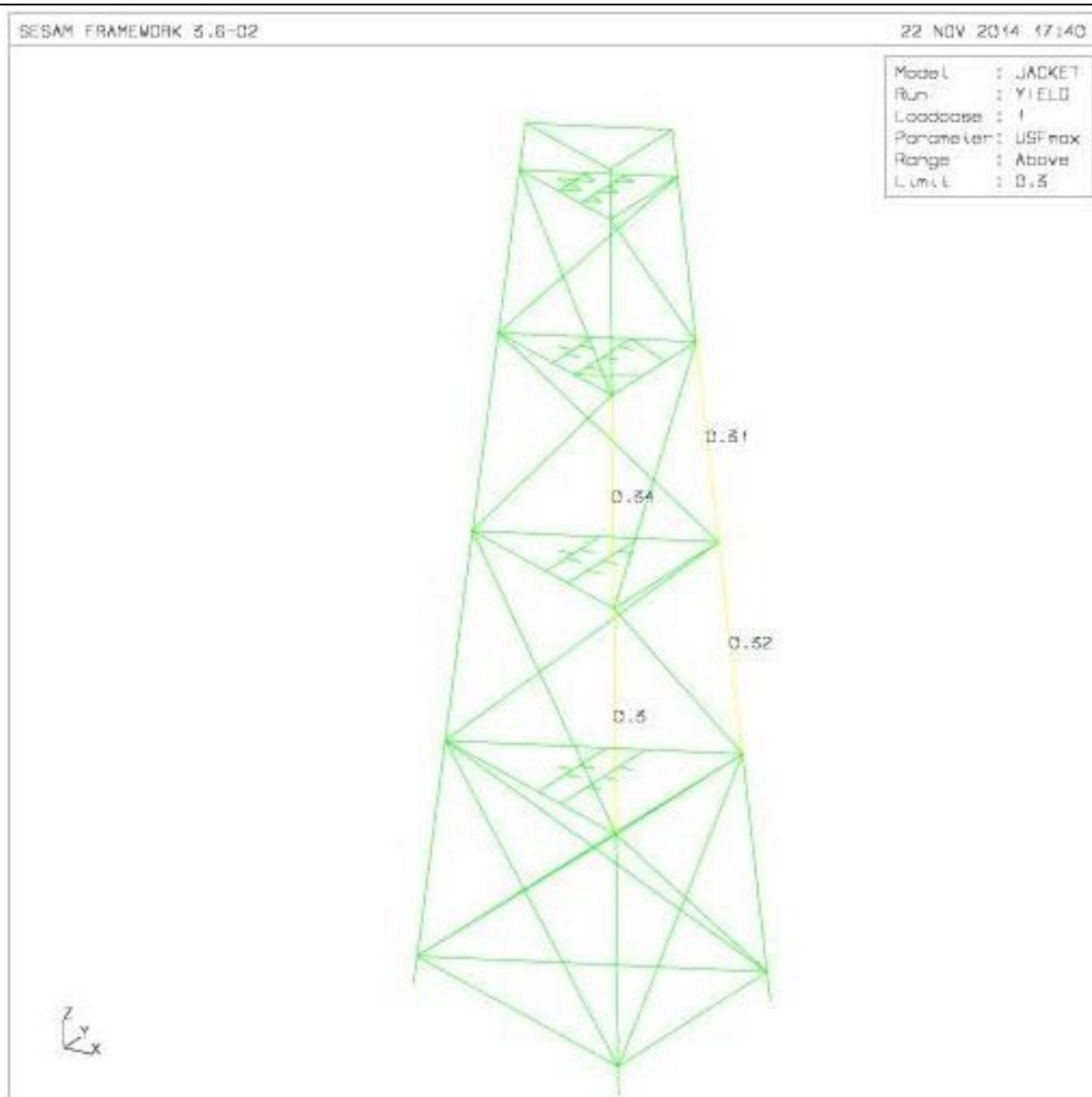


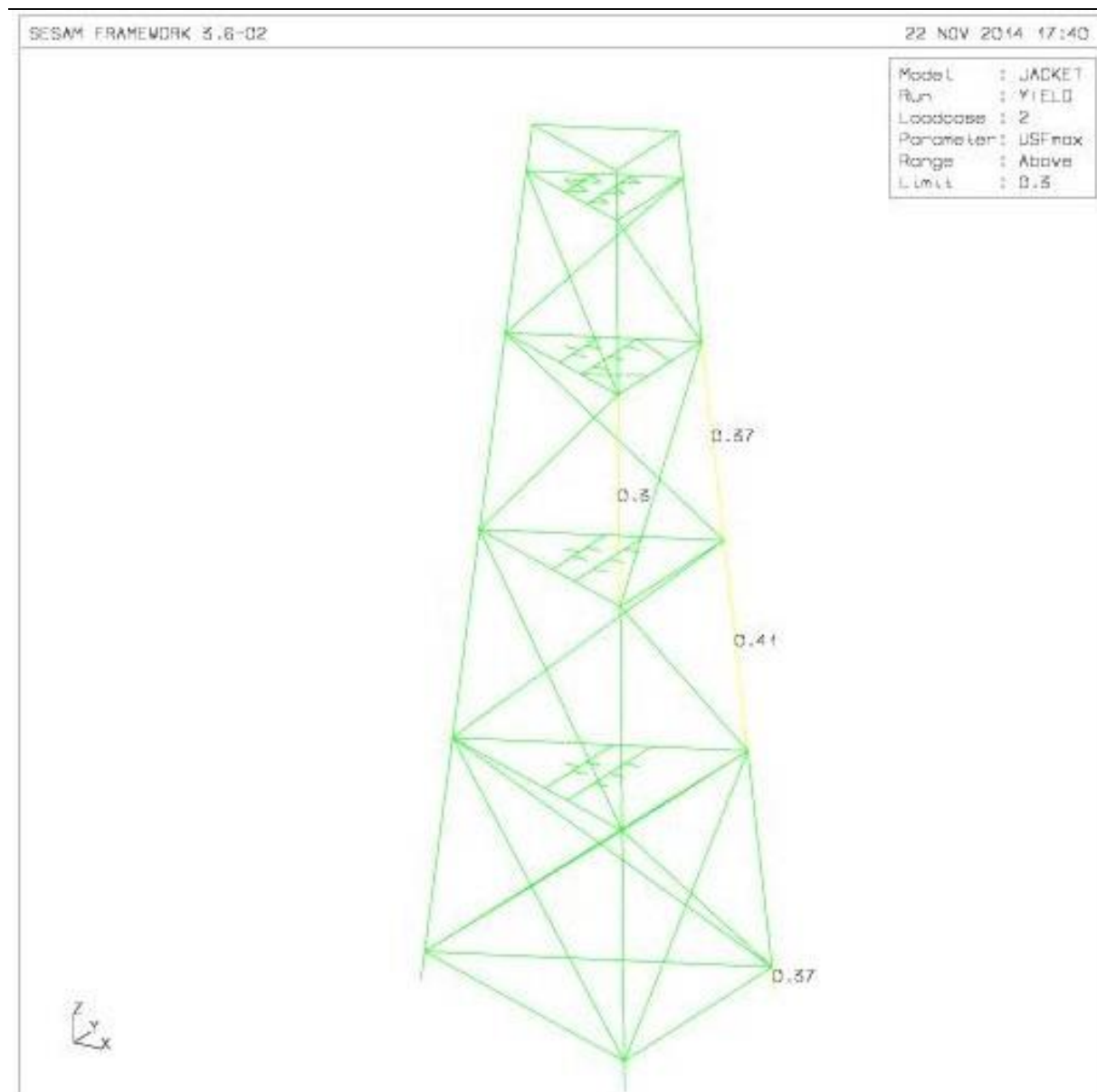


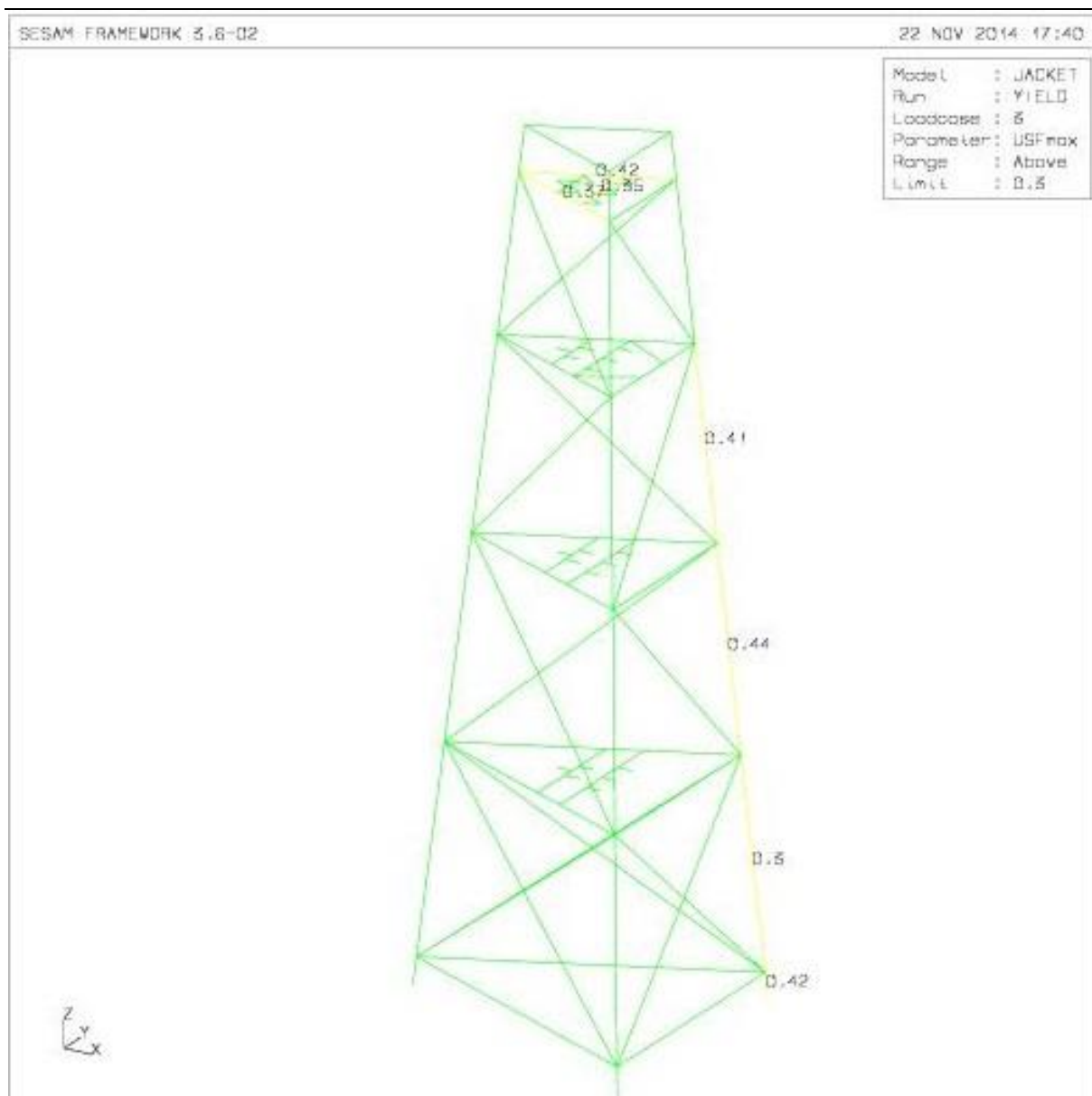


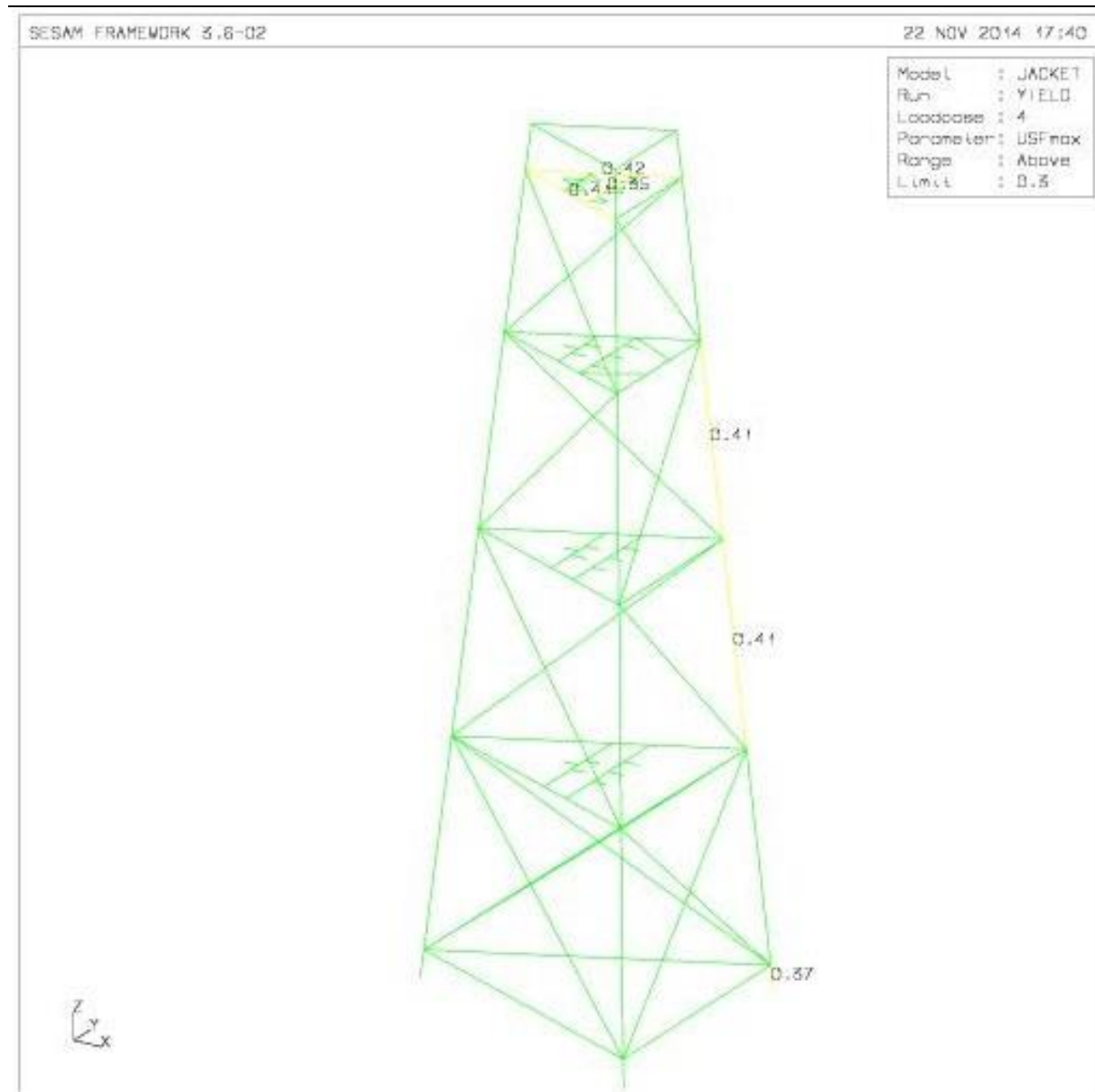


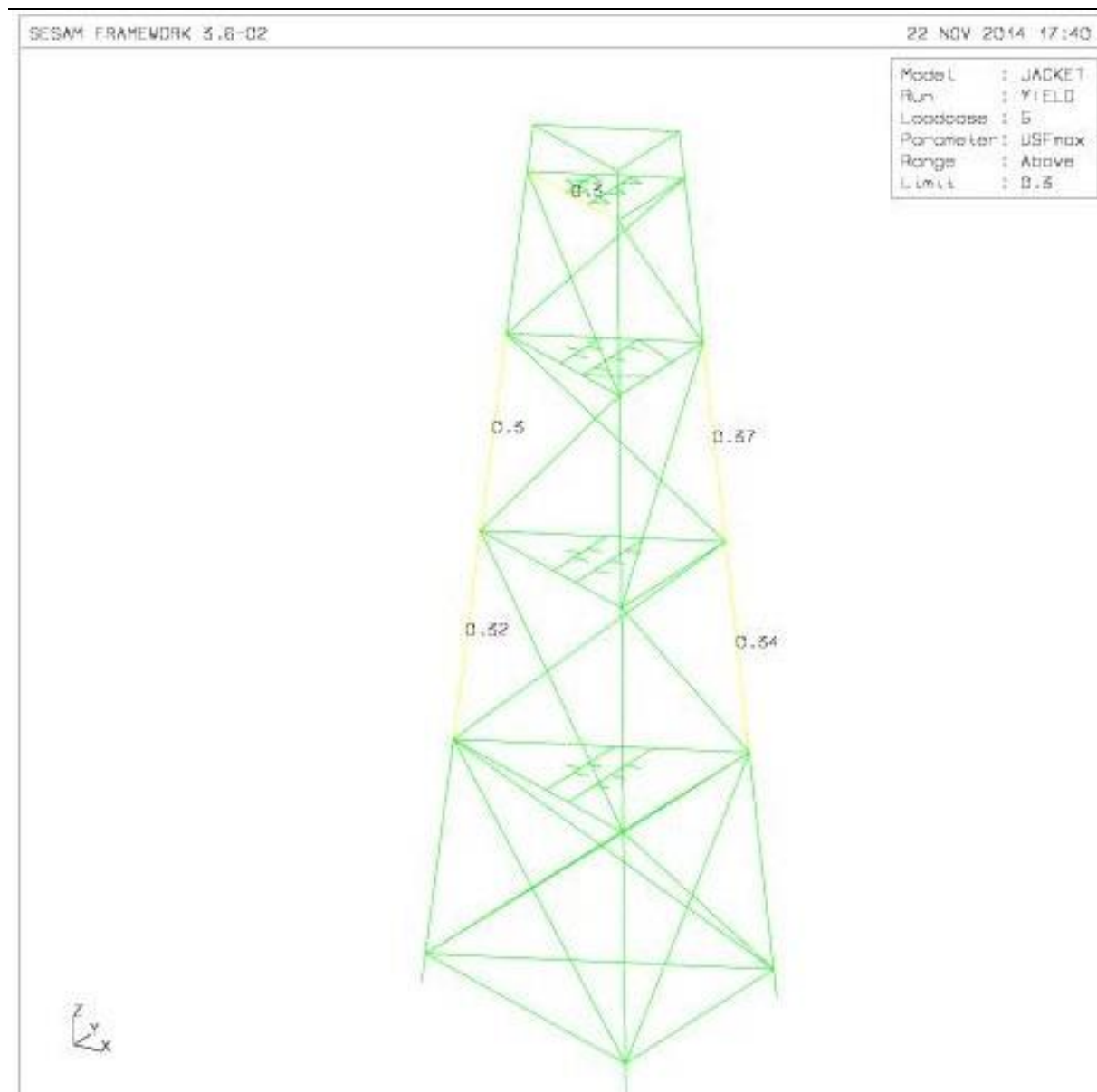


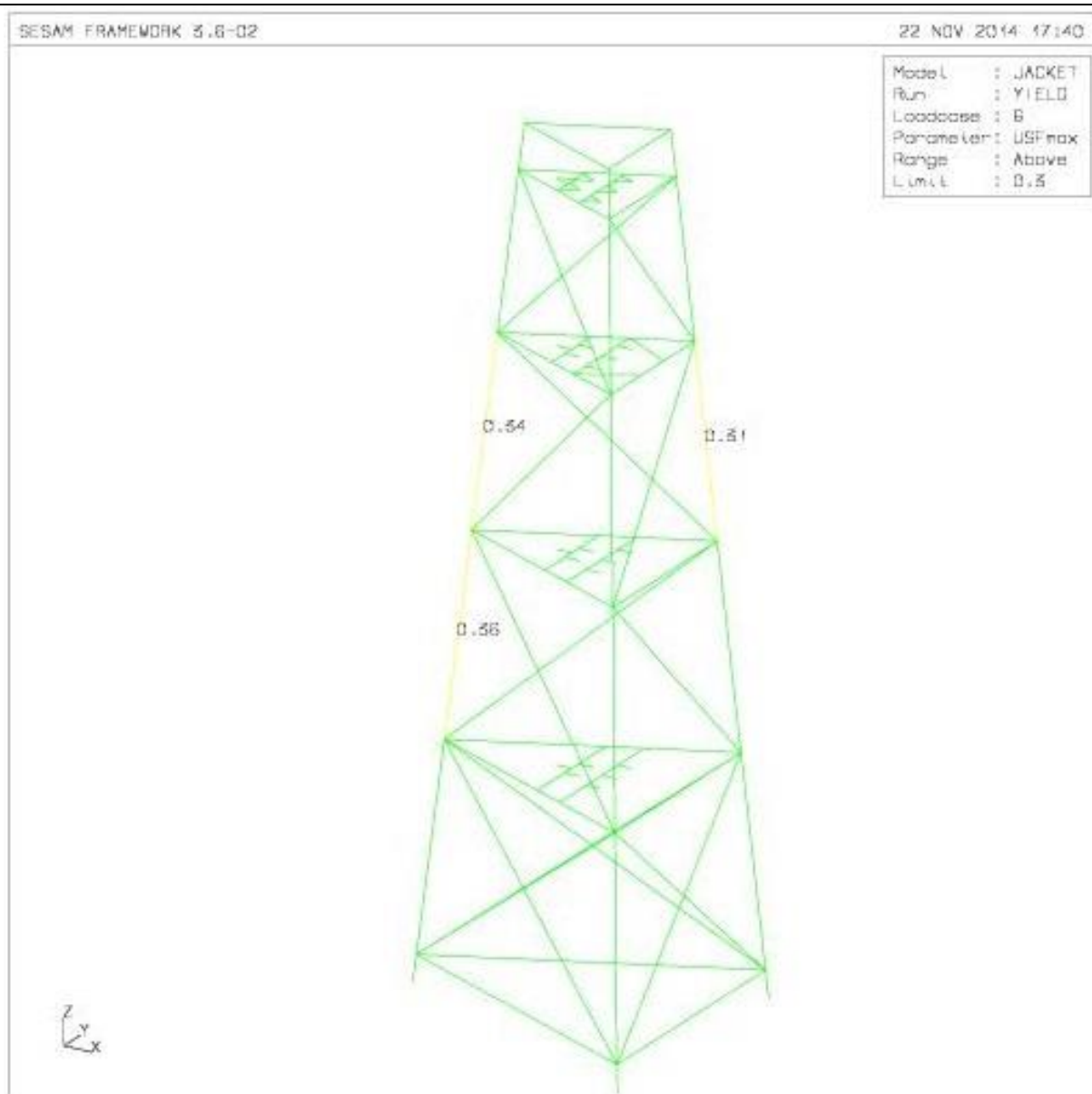


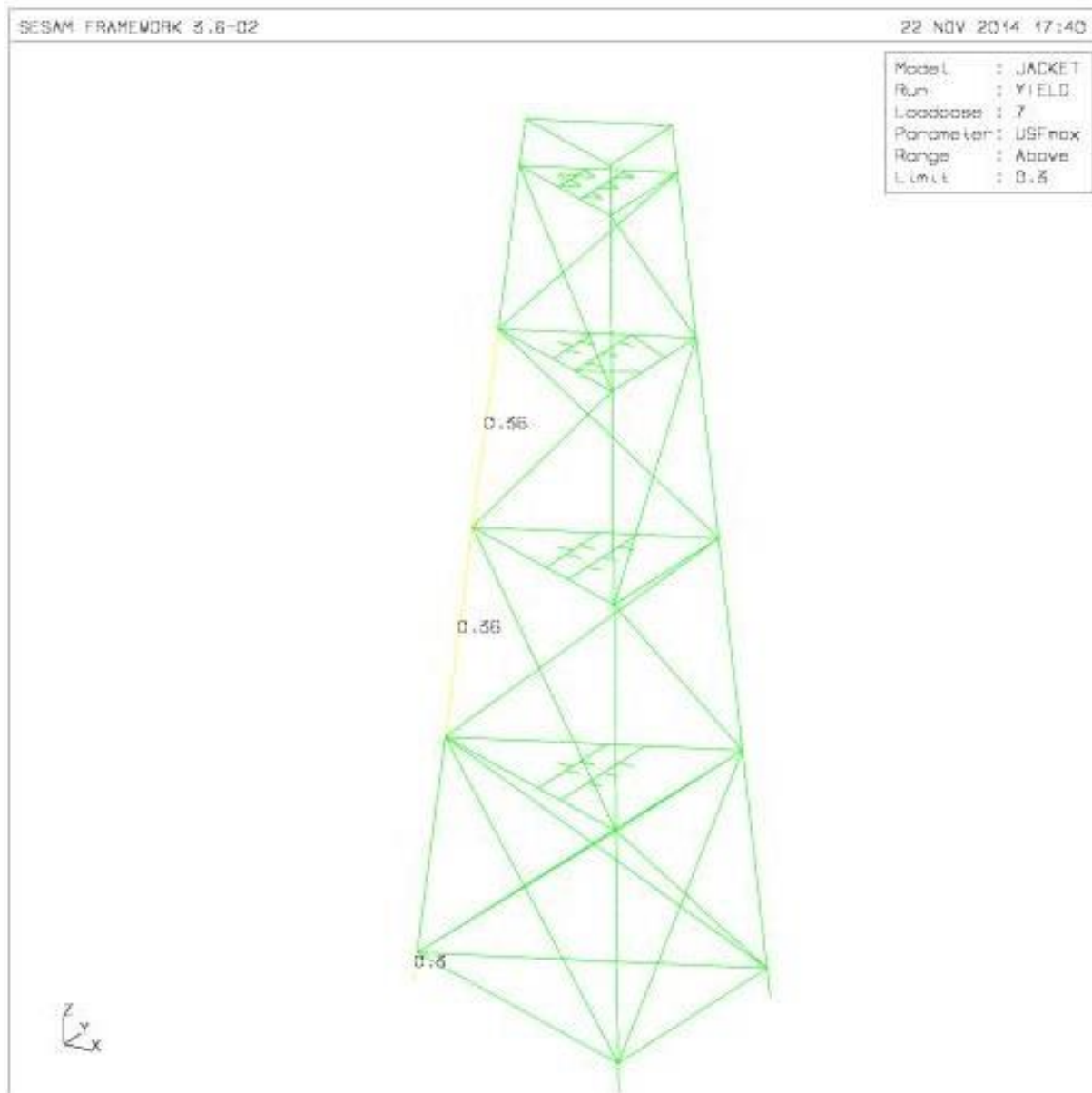


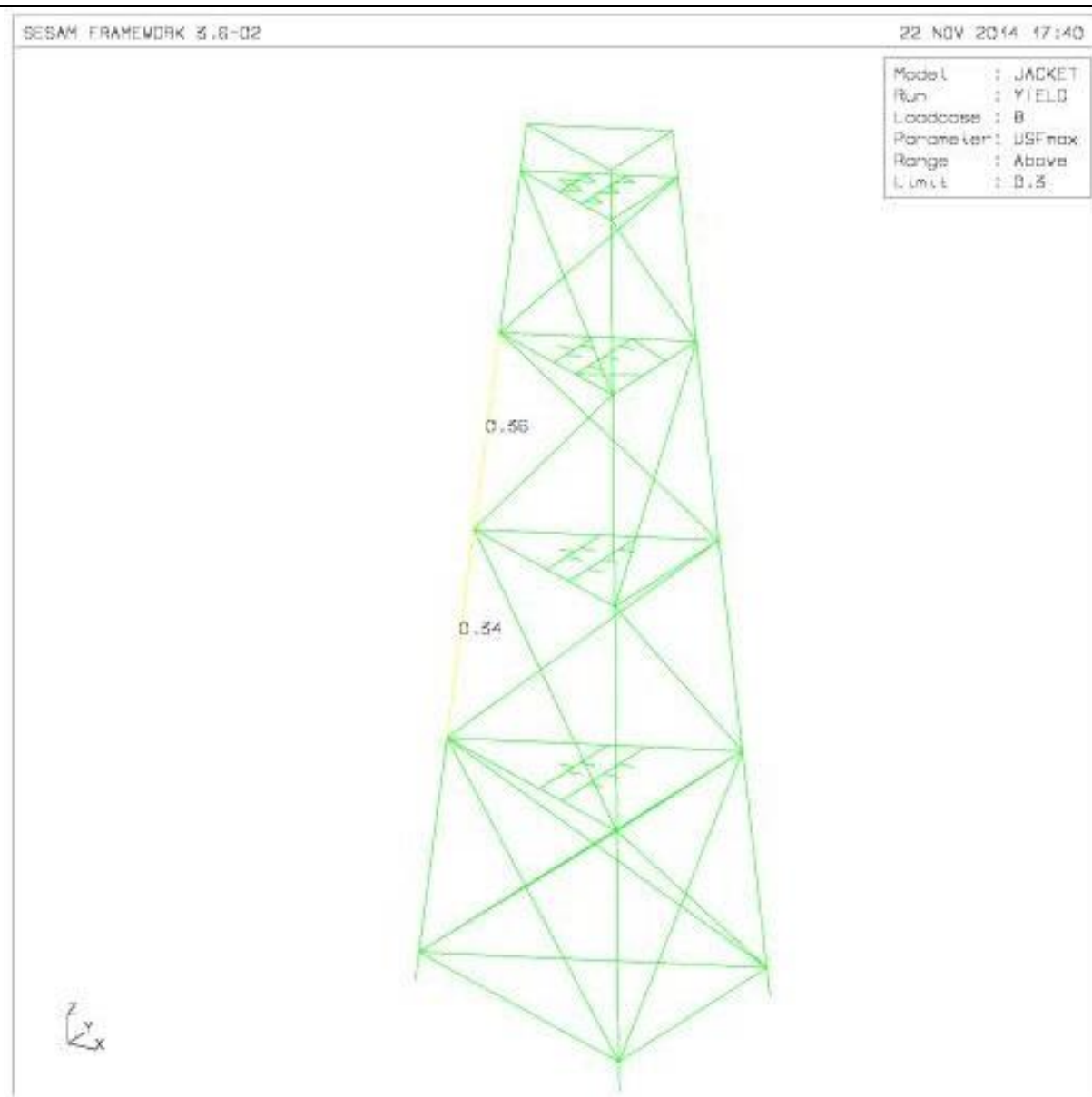




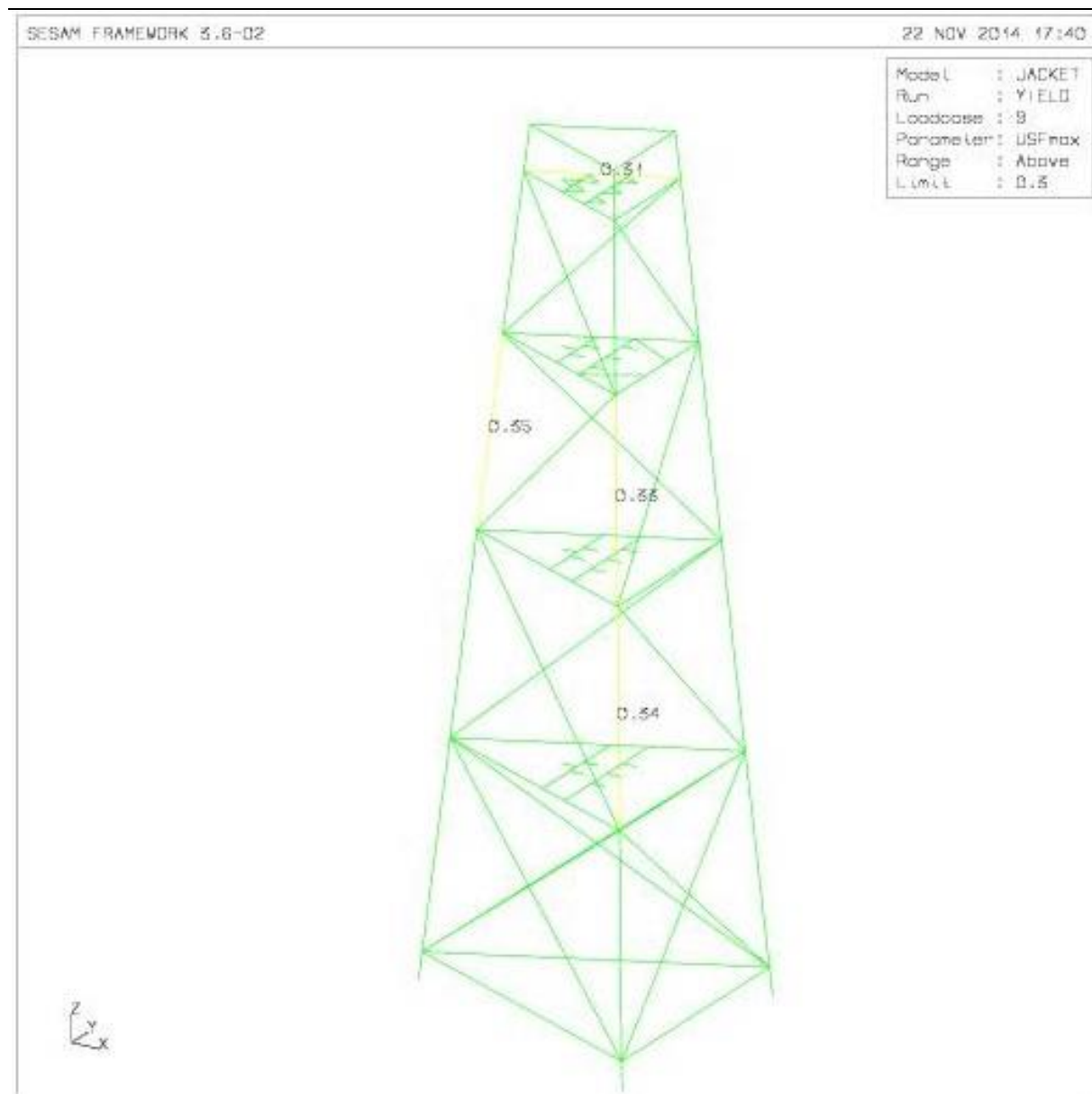


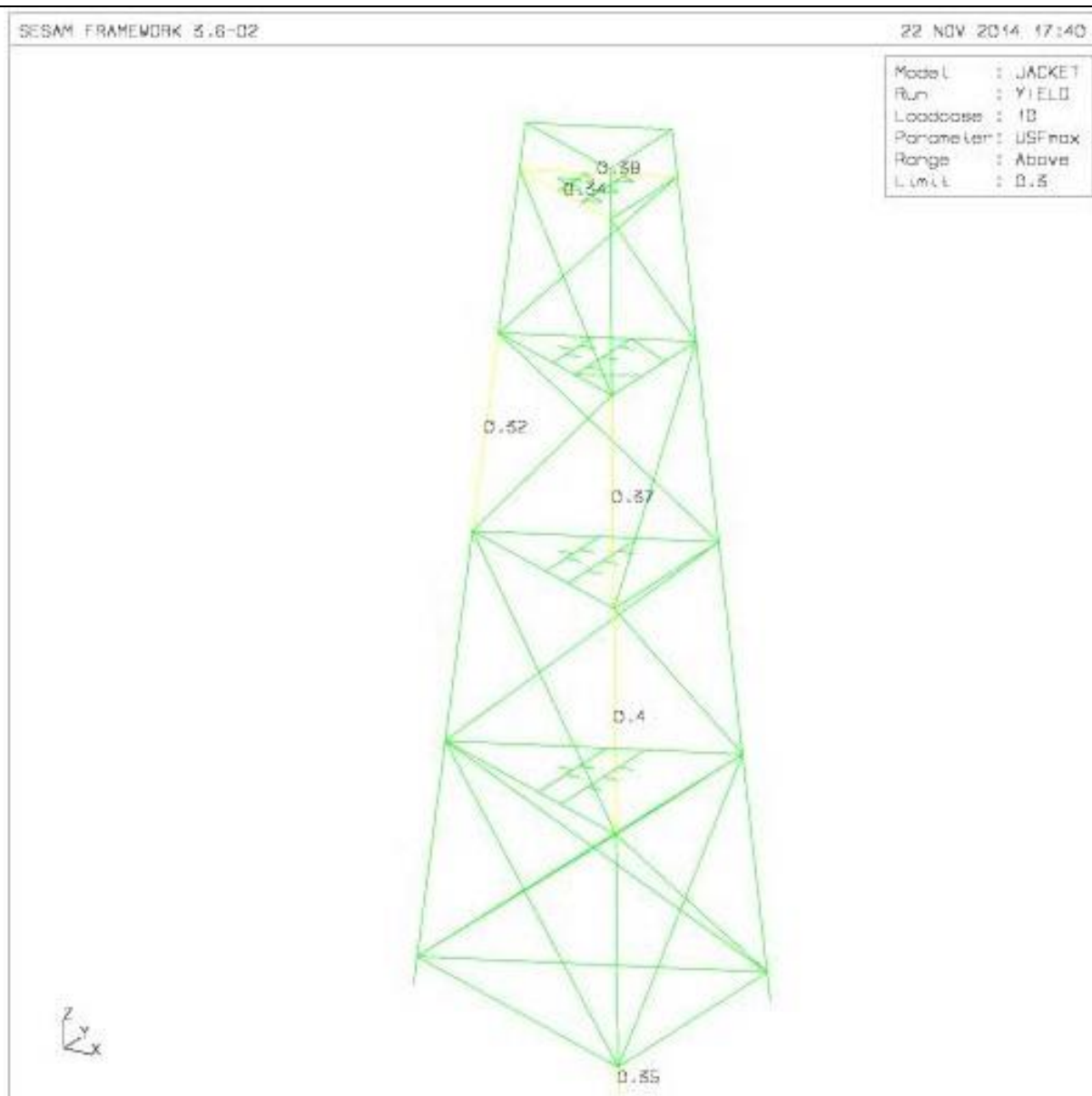


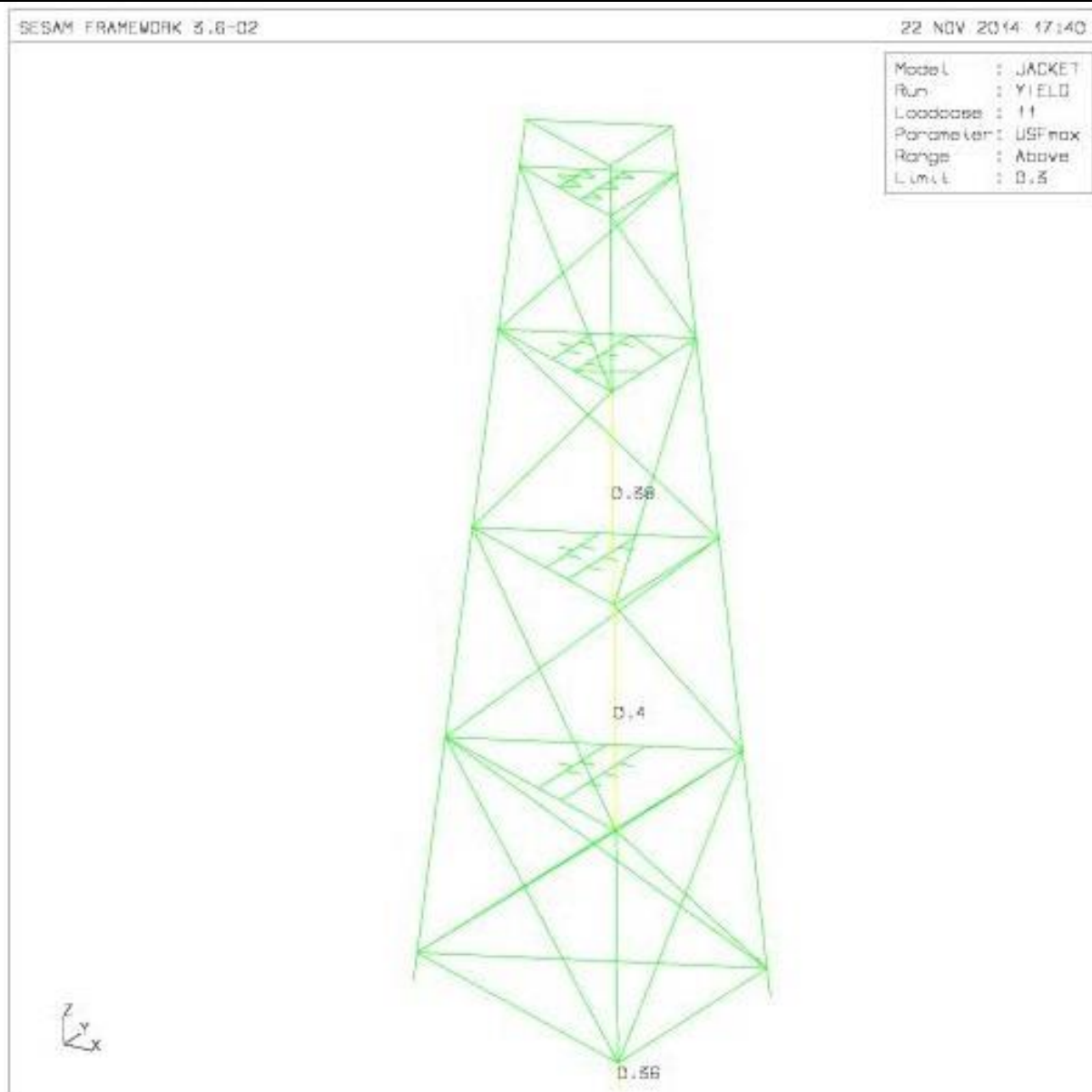


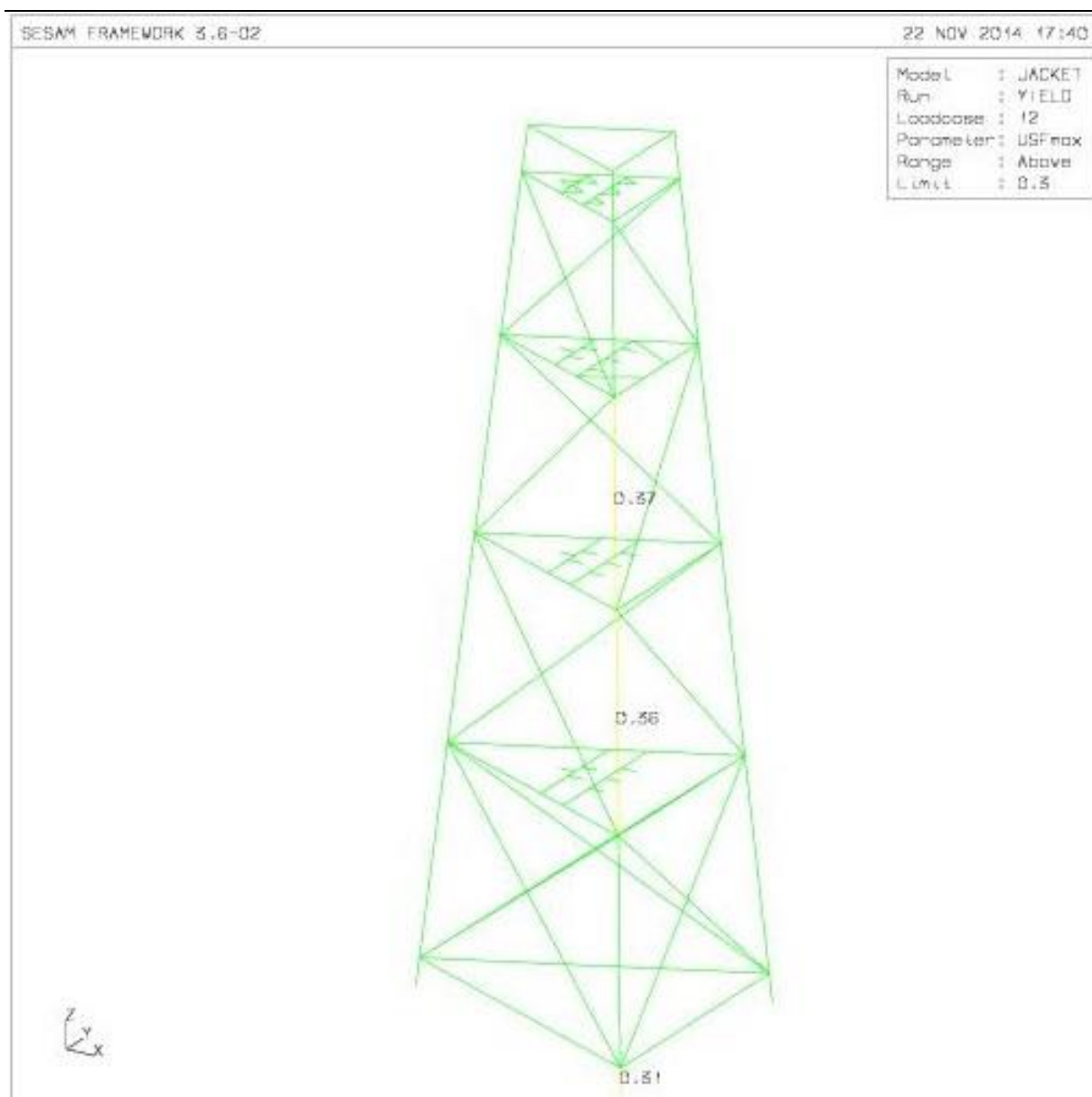


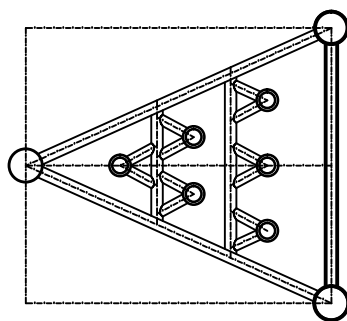
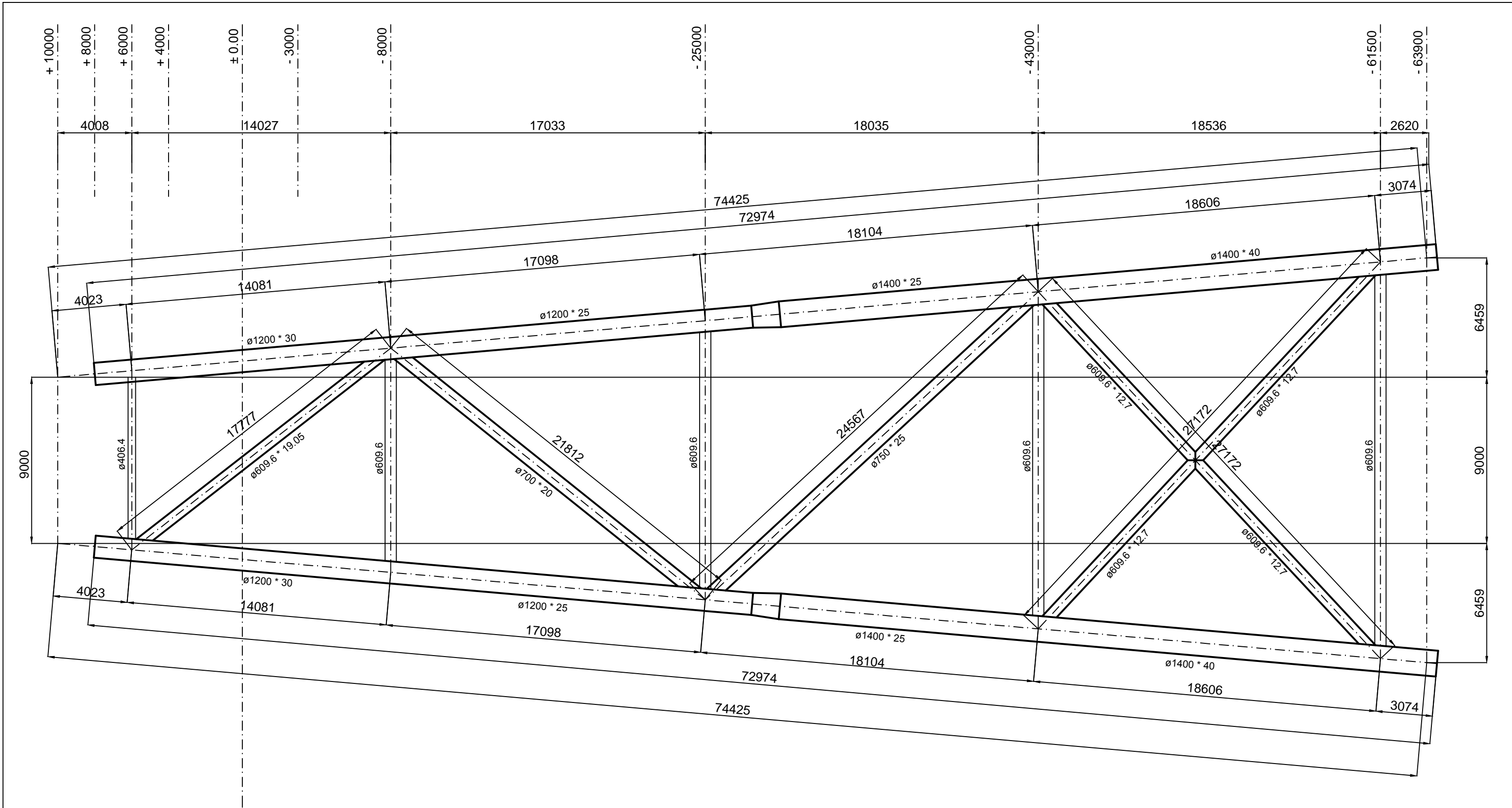












FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE _ DIPLOMSKI RAD		
STUDENT	DUJE DRAGANJA	
NASLOV RADA AK. GODINA	STATIČKA ANALIZA FIKSNE REŠETKASTE PLATFORME U JADRANSKOM MORU	2014./2015.
NAZIV PRILOGA	BOČNI POGLED NA PLATFORMU	
		Mjerilo M1:2000

